
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R1011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Výpočet termoelastického pole v hornině v okolí hlubinného úložiště

Solution of thermo-elastic field in the rock in the vicinity of deep repository

Bakalářská práce

Autor:	Ilona Škarydová
Vedoucí práce:	Ing. Milan Hokr, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Josef Novák, Ph.D.

V Liberci 15. 5. 2006

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé BP a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Milanu Hokrovi, Ph.D za všechny konzultace, užitečné rady a hodnotné připomínky, které pomohly vzniku této práce, a především za jeho trpělivost.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá řešením úloh vedení tepla a termoelasticity. Všechny výpočty, které jsou provedeny pro modely okolí hlubinného úložiště radioaktivního odpadu, jsou řešeny ve výpočtovém systému Ansys.

V tepelných analýzách zkoumáme buď vývoj tepla v okolí jednoho kontejneru (speciální nádoba, ve které by se měl jaderný odpad ukládat), nebo v okolí úložiště jako celku. Základní charakteristikou, která spojuje řešené úlohy vedení tepla, je zkoumání vlivu zjednodušení geometrie modelu na vývoj teploty v úložišti. S tím souvisí také citlivost modelu na geometrické parametry. Využívá se i zjednodušení úlohy na základě symetrií. Některé výsledky počítaných příkladů je možné porovnat s již existujícími vypočtenými daty.

Úloha termoelasticity popisuje přístup k řešení sdruženého problému. Její výsledky mají spíše informativní charakter a ukazují, jaký je vliv teploty na vznik napjatosti a deformací kontejneru.

klíčová slova: hlubinné úložiště, radioaktivní odpad, termoelastická, vedení tepla, Ansys, metoda konečných prvků

Abstract

This Bachelor Thesis deals with solution problems of heat convection and thermo-elasticity. All of the calculations were solved for models of deep repository of nuclear waste in finite element analysis software Ansys.

In thermal analysis we investigate thermal field in the vicinity of one container (it is a special vessel for storing nuclear waste), or we describe progress of heat in the whole repository. A basic characteristics, which links problems of heat convection, is investigation of influence of simplified geometry of the model on progress of temperature in repository. It is related to geometric parameters sensitivity. It is also made use of simplification based on symmetry. Some of the results is possible to compare with existing data.

Problem of thermo-elasticity has an informative character and it describes way of solving this kind of problems. It presents an influence of temperature on creation of stress and strain.

keywords: deep repository, nuclear waste, thermoelasticity, heat convection, Ansys, Finite Element Method

Obsah

Obsah	6
Seznam použitých symbolů	8
Úvod.....	9
1 Teorie vedení tepla a elasticity	10
1.1 Přenos tepla vedením	10
1.2 Mechanika pružných těles	11
1.3 Termoelasticita	12
2 Metoda konečných prvků	13
2.1 Úvod a historie	13
2.2 Základní princip MKP.....	13
2.3 Aproximační funkce.....	14
2.4 Interpolace	15
2.5 Funkce tvaru	16
2.6 Matice tuhosti.....	17
2.7 Použitý výpočtový software.....	17
3 Hlubinné úložiště	20
3.1 Radioaktivní odpad	20
3.2 Koncepce hlubinného úložiště, jeho funkce	20
3.3 Vhodná lokalita	20
3.4 Části úložiště	21
3.5 Kontejner	23
3.6 Materiály výplňových a tlumicích bariér	24
3.7 Bezpečnost hlubinného úložiště	25
3.8 Životnost kontejneru	26
3.9 Projekty hlubinných úložišť ve světě	26
4 Vývoj tepla v okolí kontejneru, 2D a 3D model	27
4.1 Úvod	27
4.2 Geometrie jednotlivých modelů	27
4.3 Zdroj tepla a okrajové podmínky	28
4.4 Výsledky a zhodnocení.....	30
5 Vývoj tepla v hlubinném úložišti jako celku	35
5.1 Úvod	35
5.2 Geometrie jednotlivých modelů	36
5.3 Zdroj tepla a okrajové podmínky	36
5.4 Výsledky a zhodnocení.....	37
6 Úloha termoelasticity	41
6.1 Úvod	41
6.2 Geometrie úlohy	41
6.3 Postup řešení	42
6.4 Úloha vedení tepla – zdroj tepla a okrajové podmínky	42
6.5 Úloha statiky – okrajové podmínky	42
6.6 Výsledky a zhodnocení.....	43
Závěr.....	45

Přílohy.....	47
Příloha A Ukázky modelů se sítí konečných prvků.....	47
Příloha B Ukázky grafického zobrazení výsledků z programu Ansys	48
Příloha C Ukázka příkazového souboru *.log.....	49
Příloha D Obsah DVD	50
Literatura.....	51

Seznam použitých symbolů

a	koeficient aproximační funkce
c	měrná tepelná kapacita
C_{ijkl}	tenzor elastických modulů
C^m	stupeň spojitosti funkce
e_{ij}	tenzor deformace
E	Youngův modul pružnosti
G	modul pružnosti ve smyku
N	funkce tvaru
$\vec{p}(x, y, z)$	vektor posunutí
\vec{q}	vektor hustoty tepelného toku
Q	teplo
t	čas
u	teplota
α_{ij}	teplotní koeficient roztažnosti
δ_{ij}	Kroneckerovo delta
λ_{ij}	tenzor tepelné vodivosti
μ	Poissonova konstanta
ρ	hustota
σ	mechanické napětí (normálové u jednoosé deformace)
τ_{ij}	tenzor napětí
Φ	polynom aproximační funkce

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá výpočtem termoelastického pole v hornině v okolí hlubinného úložiště jaderného odpadu. Protože množství radioaktivního odpadu stoupá a sám o sobě přestává být nebezpečný až velice dlouhé době, stává se potřeba hlubinného úložiště čím dál víc aktuální záležitostí. Mnoho států má již připraveny projekty těchto podzemních staveb a jsou zpracovávány a řešeny jejich modely a zkoumán vývoj tepla, kontaminace podzemních vod, případné šíření radioaktivního záření a mnoho dalších faktorů působících na jejich bezpečnost.

Zjednodušeně lze říci, že koncepce úložiště předpokládá, že se jaderný odpad bude ukládat hluboko pod povrch Země, přitom by úniku tepla a radioaktivního záření mělo zabránit několik bariér. První bariérou je speciální nádoba – kontejner, ve kterém by měl být odpad umístěn do vhodného horninového masivu. Mezi kontejnerem a horninou by se měla nalézat výplňová a těsnicí látka, nejčastěji je počítáno s bentonitem.

V této práci je řešeno několik typů úloh. V první řadě jsou to úlohy s jedním kontejnerem a jeho nejbližším okolím tvořeným granitovou horninou. V těchto příkladech je zkoumán vliv geometrie modelu kontejneru na rozložení tepla po uplynutí určitého časového intervalu. Měněna je výška kontejneru – 5 metrů, 25 metrů a nekonečně velká výška. Pro porovnání s již existujícími výpočty je řešen také vliv přítomnosti bentonitu u stejného modelu. Na základě výsledků je zkoumán průběh teploty v určitém časovém intervalu, dosažené maximum teploty, čas jeho dosažení a také průběh teploty v závislosti na vzdálenosti v okamžiku dosažení maxima teploty.

Další sada úloh se týká vývoje tepla v hlubinném úložišti jako celku. Opět zkoumáme vliv geometrie a citlivost na geometrické parametry. Pro zjednodušení vytvoření geometrie modelu se zde nebere v úvahu bentonit. V prvním případě je úložiště obsahující jednotlivé kontejnery aproximováno homogenním kvádrem o výšce odpovídající výšce jednoho kontejneru a nekonečně velkých rozměrech v obou horizontálních směrech. V případě druhém má deska konečné rozměry a je reprezentována homogenním osově symetrickým modelem. Oba modely úložiště jsou uvažovány i s blízkým granitovým okolím. Veličiny a jejich závislosti, které zkoumáme, jsou stejné jako v předchozím případě.

Jako poslední je řešena vzorová úloha termoelasticity. V problémech termoelasticity posuzujeme mechanické veličiny (deformace, mechanické napětí, posunutí,...), které vznikají vlivem působení tepla. V tomto případě se využívá osově symetrického modelu jednoho kontejneru se standardní výškou pěti metrů a jeho blízkého horninového okolí bez uvažování bentonitu.

1 Teorie vedení tepla a elasticity

1.1 Přenos tepla vedením

Při vedení tepla tzv. kondukcí dochází k výměně energie mezi sousedními částicemi soustavy vlivem jejich chaotického pohybu. Poloha částic se při tomto ději nemění, nepřenáší se hmotnost. Kondukcí je možné šířit teplo v látkách všech skupenství.

Nestacionární jev – vedení tepla reprezentuje parciální diferenciální rovnice, kterou můžeme zapsat ve tvaru:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + Q = \rho c \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (1)$$

kde q_x, q_y, q_z jsou složky vektoru tepelného toku, Q přírůstek tepla za čas t a ρ, c hustota a měrná tepelná kapacita prostředí, u je teplota.

Fourierův zákon (vektor hustoty tepelného toku je úměrný gradientu teploty), popisuje vlastnosti prostředí.

$$\begin{aligned} q_x &= -\left(\lambda_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + \lambda_{xz} \frac{\partial u}{\partial z}\right), \\ q_y &= -\left(\lambda_{yx} \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda_{yy} \frac{\partial u}{\partial y} + \lambda_{yz} \frac{\partial u}{\partial z}\right), \\ q_z &= -\left(\lambda_{zx} \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda_{zy} \frac{\partial u}{\partial y} + \lambda_{zz} \frac{\partial u}{\partial z}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

kde λ_{ij} je tenzor tepelné vodivosti.

Pokud je materiál izotropní, má symetrický tenzor tepelné vodivosti, výsledná rovnice vedení tepla vypadá takto:

$$-\nabla \cdot (-\lambda \nabla u) + Q = \rho c \frac{du}{dt} \quad (3)$$

U nestacionárních úloh je nutné zadat počáteční podmínku, která udává teplotu soustavy v čase $t = 0$. Okrajové podmínky můžeme zadat různými způsoby:

- Dirichletova podmínka – předepsaná hodnota teploty:

$$u = u_D \quad (4)$$

- Neumannova podmínka – předepsaná hodnota tepelného toku:

$$(K \nabla u) \vec{n} = q_N \quad (5)$$

- Newtonova podmínka – závislost toku přes hranici na rozdílu vnitřní a vnější teploty (\vec{n} je normála k hranici v daném směru):

$$(K \nabla u) \vec{n} = \lambda (u - u_s) \quad (6)$$

1.2 Mechanika pružných těles

Základní vlastností pružných těles je, že pokud na něj působí síla, vyvolá u něj pouze pružné deformace. Když na toto těleso přestane síla působit, deformace tělesa zaniká. Dokonale pružné těleso je určitým ideálem, ale chováním tomuto modelu odpovídá čistá krystalická látka, na kterou působí malé síly.

Pružné těleso můžeme popsat hned několika veličinami. Základními jsou deformace a napjatost. *Deformace* je popsána polem posunutí $\vec{p}(x, y, z, t)$, které vyjadřuje rozdíl polohy tělesa v deformovaném a nedeformovaném stavu. Lokální deformaci můžeme popsat tenzorem deformace ve formě matice:

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ e_{zx} & e_{zy} & e_{zz} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Kde složky ležící na diagonále vyjadřují relativní prodloužení ve směru příslušné souřadné osy a složky mimo diagonálu určují zkosení v rovině určené příslušnými dvěma osami. (Platí zde symetrie $e_{ij} = e_{ji}$, takže matice tenzoru deformace obsahuje pouze šest nezávislých složek.) Obecně jsou složky tenzoru definovány podle tohoto vztahu:

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial p_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p_j}{\partial x_i} \right), \text{ kde } i, j = 1, 2, 3 \quad (8)$$

Pod pojmem *napjatost* si můžeme představit vnitřní síly působící v materiálu. Napjatost se reprezentuje tenzorem napětí τ_{ij} (opět ve formě matice), který je stejně jako tenzor deformace symetrický.

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Mezi tenzorem deformace a tenzorem napětí platí následující vztah:

$$\tau_{ij} = \sum_{k,l} C_{ijkl} e_{kl}, \quad (10)$$

kde C_{ijkl} je tenzor 4. řádu a vyjadřuje konstantu úměrnosti, tzv. elastické moduly. Vzhledem k symetriím obsahuje však tato konstanta pouze 21 nezávislých složek. Navíc pro izotropní materiály jsou pouze dvě nezávislé. Jsou jimi Youngův modul pružnosti E a Poissonova konstanta μ . Pro jednorozměrný případ vyjadřuje Poissonova konstanta bezrozměrný poměr mezi příčným a podélným relativním

prodloužením a nabývá hodnoty z intervalu $\langle 0; 0,5 \rangle$. Dalším koeficientem, s kterým se můžeme setkat je modul pružnosti ve smyku G . Tato materiálová konstanta však již závisí na E a μ , závislost je určená vztahem:

$$G = \frac{E}{2(1-\mu)} \quad (11)$$

Okrajové podmínky můžeme opět zadat různými způsoby:

- Dirichletova podmínka – předepsaná hodnota posunutí:

$$p = p_D \quad (12)$$

- Neumannova podmínka – předepsaná hodnota síly:

$$(K \nabla p) \vec{n} = q_N \quad (13)$$

- Newtonova podmínka – kombinace posunutí a síly:

$$(K \nabla p) \vec{n} = \lambda (p - p_3) \quad (14)$$

1.3 Termoelasticita

Vlivem teploty se vytváří v elastických tělesech napětí. Tato teplotní napětí vznikají tepelnou roztažností materiálů v tělesech s teplotním gradientem i v tělesech rovnoměrně ohříváných, avšak zhotovených z různých či nehomogenních materiálů. A také ve staticky neurčitě uložených konstrukcích.

Pokud není těleso nijak zatíženo, pro tenzor deformace e_{ij} platí:

$$e_{ij} = \alpha_{ij} (u - u_0), \quad (15)$$

kde α_{ij} je koeficient teplotní roztažnosti a $u - u_0$ rozdíl konečné a počáteční teploty.

Je-li těleso teplotně izotropní, potom můžeme psát:

$$e_{ij} = \alpha \delta_{ij} (u - u_0), \quad (16)$$

kde δ_{ij} je *Kroneckerovo delta*. Pro upevněné těleso, které není možno deformovat, se indukují napětí σ :

$$\sigma = -E\alpha\delta_{ij} (u - u_0), \quad (17)$$

(E je modul pružnosti)

Jestliže na těleso působí zatížení, můžeme tenzor τ_{ij} napětí vyjádřit *Duhamel-Neumannovým zákonem* (viz [1]):

$$\tau_{ij} = C_{ijkl} (e_{kl} - \alpha \delta_{kl} (u - u_0)), \quad (18)$$

C_{ijkl} je tenzor elastických modulů a $u - u_0$ rozdíl konečné a počáteční teploty.

2 Metoda konečných prvků

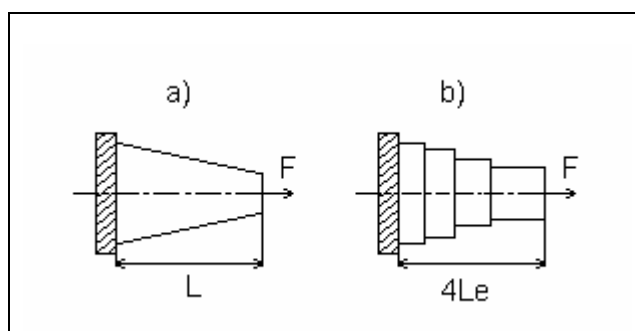
2.1 Úvod a historie

Metoda konečných prvků (MKP, FEM, Finite Element Method) je numerická metoda pro analýzu struktur a těles. Většinou touto metodou řešíme problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. Metoda pokrývá celou řadu fyzikálních aplikací např. statika, dynamika, akustika, teplo, elektromagnetické pole, elektrostatika, piezoelektrické jevy a proudění. Tato metoda řeší dané problémy soustavou lineárních rovnic, jež lze úspěšně řešit za použití výpočetní techniky – metoda konečných prvků se dnes hojně využívá ve výpočetních softwarových systémech, implementována je i v Ansysu.

Poprvé byla MKP použita na počátku dvacátého století, kdy šlo o pokus nahradit těleso soustavou elastických prutů. Posunutí v uzlech prutů tehdy odpovídalo posunutí v odpovídajících bodech tělesa. Tento model posléze přešel do metody analýzy struktur. V roce 1941 byla MKP popsána Courantem, nebyla však přijata, protože tehdy ještě neexistovaly prostředky k řešení rozsáhlých soustav lineárních rovnic. V 50. letech byly rovnice tuhosti popsány v maticovém tvaru, což umožnilo jejich řešení na počítači. V 60. a 70. letech se začaly hojně vytvářet programy využívající MKP. Dnes je trhu mnoho programů různých možností řešení, různé velikosti, ale i ceny.

2.2 Základní princip MKP

Základním principem metody konečných prvků je diskretizace tělesa na malé části (prvky), které se dají matematicky snadno popsat.



Obr. 1 – Diskretizace a MKP

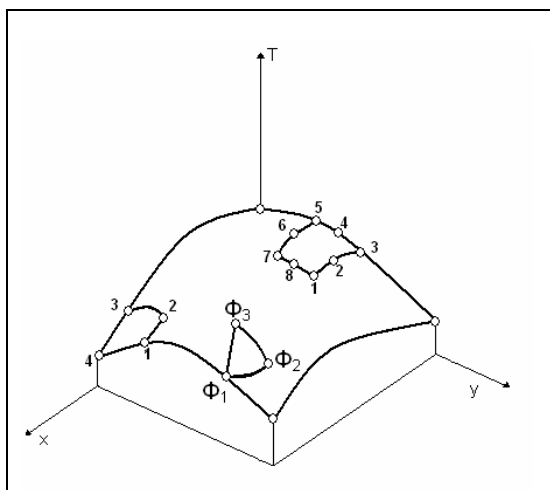
Na Obr. 1 můžeme vidět diskretizaci a) klasické řešení, b) čtyř prvkový model. Klasické řešení vyžaduje napsat diferenciální rovnice pro plynule se zužující prut, řešení rovnice pro osově posunutí \bar{p} jako funkce x v mezích $\langle 0; L \rangle$. Naproti tomu řešení pomocí MKP spočívá v diskretizace prutu na čtyři konečné prvky různých, ale

konstantních průřezů. V těchto prvcích prodloužení roste lineárně se vzdáleností x . Prodloužení jednotlivých prvků je pak dáno vztahem:

$$\Delta L_e = \frac{FL_e}{ES_e} \quad (19)$$

Výsledné prodloužení celého prutu je pak dáno součtem prodloužení jednotlivých prvků. Uvedená diskretizace je základem tzv. *deformační metody*. Jejím zobecněním vznikla nejužívanější varianta metody konečných prvků. Teoretickým základem FEM je *Lagrangeův variační princip*.

2.3 Aproximační funkce



Obr. 2 – Aproximační funkce

Fyzikální vlastnosti tělesa (posunutí, napětí, teplota,...) lze nahradit speciální funkcí prostorových souřadnic. Tato funkce se nazývá aproximační funkcí nebo také funkcí tvaru.

Na Obr. 2 je funkce $T(x,y)$, která charakterizuje rozložení teploty na rovinné obdélníkové desce. Tuto neznámou funkci nahradíme v jednotlivých uzlech aproximační funkcí, která musí mít tolik členů, kolik má prvek uzlů. Pro trojúhelníkový prvek je to například polynom prvního stupně:

$$\Phi = a_1 + a_2x + a_3y, \quad (20)$$

který se snaží přiblížit funkci $T(x,y)$. Koeficienty a_i rovnice (20) získáme na základě řešení polynomu pro všechny tři uzly trojúhelníkového prvku – řešíme soustavu tří rovnic o třech neznámých:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 \\ \Phi_2 &= a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 \\ \Phi_3 &= a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3\end{aligned}\tag{21}$$

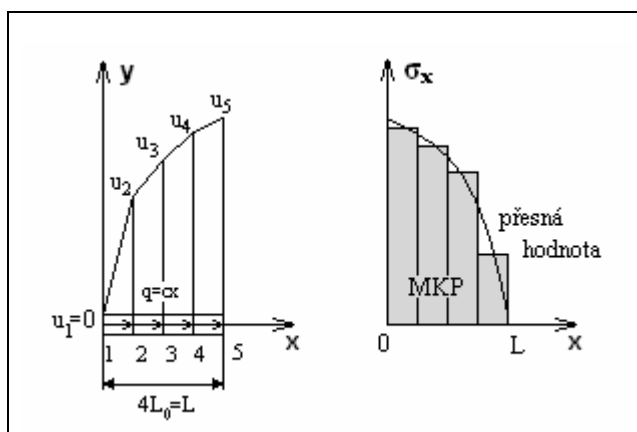
Obdélníkový prvek se čtyřmi uzly má potom následující polynom:

$$\Phi = a_1 + a_2 x + a_3 xy + a_4 y\tag{22}$$

Rozhodnutí, který prvek, s kterou aproximační funkcí použít, nemá jednoznačná pravidla. Jeden prvek může dát více či méně přesný výsledek v závislosti na tvaru, okrajových podmínkách a druhu analýzy. Většinou se vše řídí zkušenostmi a znalostmi řešitele v oboru MKP a matematiky. Obecně však platí, že s rostoucím počtem uzlů prvku roste přesnost aproximační funkce i celkového výsledku analýzy. Nesmíme však zjemnění přehnat, protože by nám výsledek znehodnotil vliv reprezentace reálných čísel v počítači. Není-li k dispozici matematicky přesný prvek, lze řešení rozdělit na větší počet méně přesných prvků. S rostoucím počtem uzlů prvků a s rostoucím počtem prvků samotných rostou i nároky na kapacitu a výkon výpočetní techniky.

2.4 Interpolace

Interpolace (Obr. 3) je postup, jímž se přibližně určuje hodnota funkce $f(x)$ v bodě $x \in (a, b)$, jsou-li známy její hodnoty v jiných bodech intervalu $\langle a, b \rangle$. Interpolace je základem MKP. Malá část složitého pole může být modelována polem jednoduchým. Lineární interpolační pole lze s úspěchem použít při dostatečně velkém počtu prvků. Prvky založené na kvadratickém nebo kubickém poli mohou poskytnout přesnější výsledek, může jich být méně, ale prvky budou mít mnohem složitější strukturu.

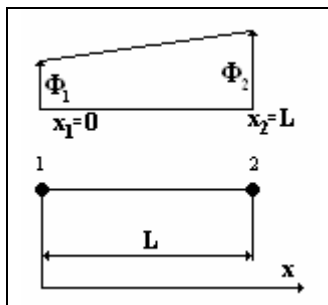


Obr. 3 – Interpolace

2.5 Funkce tvaru

Pro popis funkce tvaru si definujeme *stupeň spojitosti* funkce nebo pole:

Pole (funkce) má stupeň spojitosti C^m tehdy, jestliže jsou m -té derivace pole (funkce) spojitě.



Obr. 4 – Funkce tvaru

2.5.1 Funkce tvaru pro prvky stupně spojitosti C^0

Jednotlivé prvky můžeme popsat funkcí tvaru $[N]$, která závisí na aproximační funkci. Pole Φ je pak interpolováno z jeho n uzlových hodnot $\{\Phi_e\} = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n\}$ pomocí následujícího vztahu:

$$\Phi = [N] \{\Phi_e\} = \sum_{i=1}^n N_i \Phi_i, \quad (23)$$

kde N_i je funkce souřadného systému a popisuje rozložení pole Φ uvnitř prvku tak, že i -tá uzlová hodnota Φ_i je jednotková, zatímco ostatní uzlové hodnoty jsou rovny nule.

Př. Funkce tvaru pro jednorozměrný prvek Obr. 4

Lineární interpolace prutu je reprezentována dvěma uzly, mezi kterými je pole Φ interpolováno pomocí lineárního polynomu:

$$\Phi = a_1 + a_2 x = [1 \quad x] \{a_i\}, \quad (24)$$

Pole Φ má v uzlu č. 1 hodnotu Φ_1 a v uzlu č. 2 hodnotu Φ_2 , tj. pro $x=0$ je $\Phi = \Phi_1$ a pro $x=L$ je $\Phi = \Phi_2$. Tuto vazbu můžeme zapsat následujícím způsobem:

$$\begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \{d\} = [A] \cdot \{a\} \quad (25)$$

Rovnici (25) budeme řešit pro $\{a\}$, výsledek dosadíme do (24):

$$\{a\} = [A]^{-1} \cdot \{d\} \Rightarrow \Phi = [1 \quad x] \cdot [A]^{-1} \cdot \{\Phi_i\} \quad (26)$$

Funkci tvaru získáme z rovnic (23) a (25) ve tvaru:

$$[N] = [1 \quad x] \cdot [A]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{L-x}{L} & \frac{x}{L} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Vlastnosti funkce tvaru: Všechny funkce tvaru N_i a samotné funkce Φ jsou polynomy stejného řádu. Pro každou funkci N_i platí, že $N_i=1$ pro $x=x_i$ a $N_i=0$ pro $x=x_j$, $i \neq j$. Součet funkcí tvaru pro C^0 prvek je roven jedné: $\sum n_i$.

2.6 Matice tuhosti

V metodě konečných prvků hledáme pomocí strukturální analýzy hodnotu posunutí v jednotlivých uzlech a z posunutí následně odvodíme další výsledky (napětí, deformace,...). Základním prostředkem je princip minimální potenciální energie. (Ze všech možných hodnot posunutí daných okrajovými podmínkami je nejpravděpodobnější ta, pro níž bude celková potenciální energie tělesa minimální.) Musíme tedy určit potenciální energii všech uzlových stupňů volnosti pole posunutí, které je definováno interpolací z posunutí v jednotlivých uzlech. Minimum potenciální energie získáme, položíme-li první derivaci rovnou nule. Řešením je pak rovnice s argumenty odpovídající matici tuhosti prvku $[k_e]$.

Matice tuhosti v mechanice je obecně chápána jako koeficient úměrnosti mezi neznámým vektorem potenciálu (posunutí) a známým vektorem hodnot zdrojů (objemové síly).

2.7 Použitý výpočtový software

Všechny úlohy uvedené v této práci jsou řešeny v programu Ansys. Tento široký výpočetní (modelovací) nástroj, založený na metodě konečných prvků, obsahuje prostředky pro výpočet úloh z mnoha různých oblastí fyziky. Obr. 5 dokumentuje různé aplikace Ansysu.

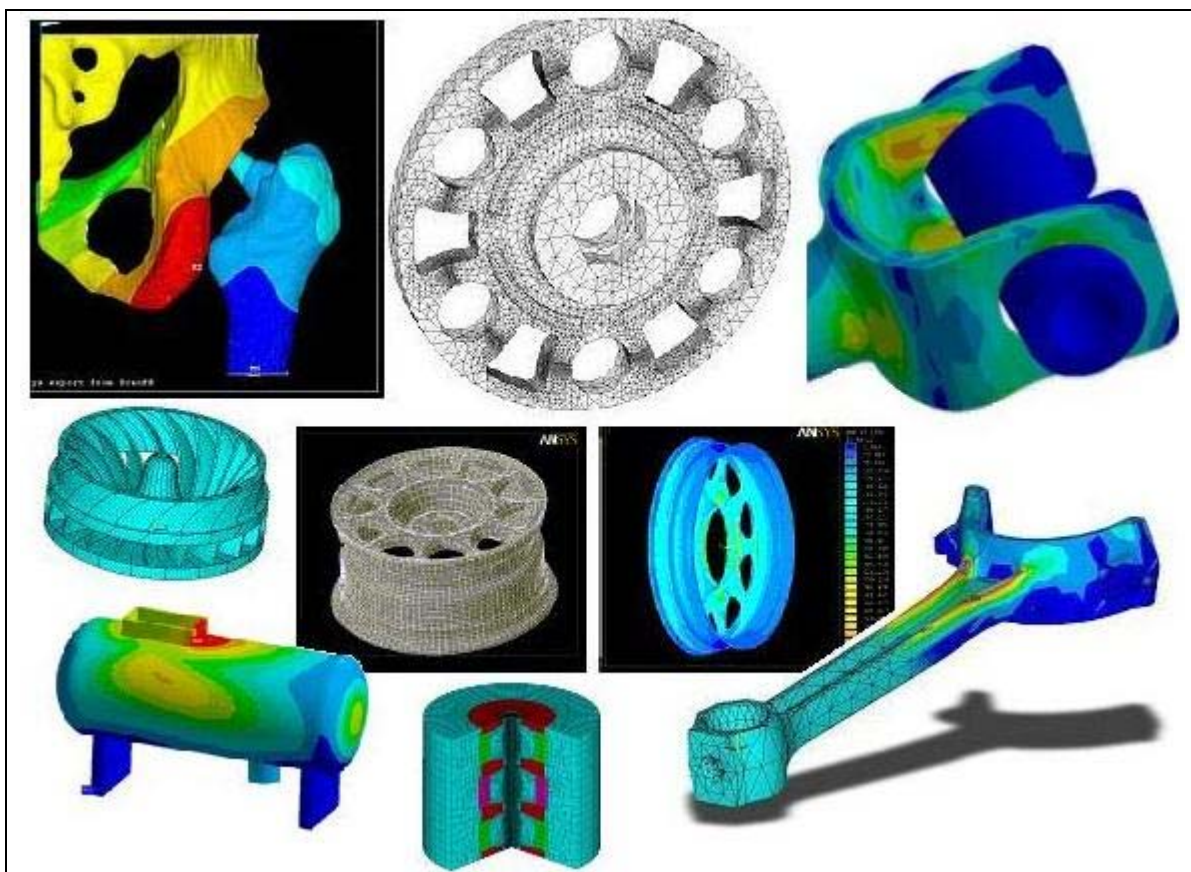
Řešit jím můžeme stacionární, nestacionární, lineární i nelineární (jak geometricky tak fyzikálně) úlohy i celou řadu sdružených problémů. Zatímco pro některé typy sdružených úloh stačí použití adekvátní formulace konečných prvků (např. pro teplotně-mechanické, elektromagnetické a piezoelektrické úlohy), jiné vyžadují umístění speciálních elementů na rozhraní interagujících prostředí – to je obecně případ kontaktních úloh. Velkou předností Ansysu je přímá podpora importu geometrií z některých CAD systémů, možnost volby mezi dvěma metodami pro potřeby adaptace sítě a dále také podpora jak parametrické, tak topologické optimalizace.

Řešení standardní úlohy se zhruba provádí v následujících krocích:

- Preprocessing:
 - zadání typu analýzy
 - výběr elementu podle typu řešené úlohy
 - zadání geometrie úlohy
 - zadání materiálových konstant
 - vygenerování sítě konečných prvků
 - zadání počátečních a okrajových podmínek
 - další možná nastavení
- Vyřešení úlohy:
 - samotný výpočet
- Postprocessing:
 - vyhodnocení výsledků
 - zobrazení modelu se zvolenou veličinou v barevné škále (případně zobrazení deformací modelu)
 - vygenerování grafů
 - získání datových souborů pro další zpracování

Ovládání Ansysu je možné dvěma způsoby. Buď v tomto prostředí pracujeme interaktivně, kdy veškerá nastavení provádíme pomocí myši – lepší názornost. Druhá možnost je práce pomocí příkazového řádku zadáváním jednotlivých příkazů. V obou případech vzniká soubor obsahující všechna zadaná nastavení v podobě příkazů, kterými při jejich znalosti přizpůsobíme či pozměníme model.

V Příloze A jsou zobrazeny síť konečných prvků, Příloha B ukazuje grafickou reprezentaci výsledných rozložení teplot a Příloha C uvádí část jednoho příkazového souboru. Všechny materiály v přílohách jsou z úloh počítaných v programu Ansys pro potřeby této bakalářské práce.



Obr. 5 – Příklad modelů z Ansysu

3 Hlubinné úložiště

3.1 Radioaktivní odpad

V dnešní době se čím dál víc začíná řešit otázka, jak nakládat s jadernými odpady, a to jak ve vědeckých kruzích, tak v rámci široké veřejnosti. Ale co to vlastně jaderný odpad je? Jaderným nebo také radioaktivním odpadem můžeme nazvat všechny látky, které obsahují radioaktivní prvky a již nemají žádné praktické použití. Vznikly jadernými reakcemi, například v energetice (vyhořelé palivové tyče v jaderných elektrárnách), ale mnoho jaderného odpadu se vyprodukuje také ve zdravotnictví, průmyslu a výzkumu.

3.1.1 Nízko, středně a vysoce radioaktivní odpad

Většina tohoto odpadu je nízko a středně radioaktivní, což znamená, že dosahují nízké radioaktivity na jednotku hmotnosti nebo objemu. Tento odpad není pro člověka tolik nebezpečný, může se před ním ochránit prostřednictvím speciálního oděvu, nebezpečí však hrozí při požití, vdechnutí a podobně. Mnohem nebezpečnější je vysoce radioaktivní odpad, který přestává být pro člověka riskantní až po dlouhých sto tisících letech, proto vyvstává otázka, kam radioaktivní odpad na tak dlouhou dobu odklidit, aby neohrožoval člověka a životní prostředí.

3.2 Koncepce hlubinného úložiště, jeho funkce

Teoreticky možné by bylo odpad skladovat ve speciální nádobě – kontejneru, který by měl takové vlastnosti, aby odstínil škodlivé radioaktivní záření a byl by co nejdéle odolný proti korozi a vnějším vlivům. Protože však každý materiál má omezenou životnost, bylo by značně neefektivní a riskantní, při každém opotřebení vyměnit starý kontejner za nový. Proto vznikla myšlenka ukládat radioaktivní odpad hluboko pod zemský povrch – v hlubinném úložišti, kde bude chráněn před veškerými procesy, které budou probíhat na povrchu Země, ale také před člověkem a člověk před ním. Radioaktivní odpad by se do úložiště umisťoval postupně a po jeho zaplnění by byl přístup do úložiště zasypán a uzavřen.

3.3 Vhodná lokalita

Je zřejmé, že hlubinné úložiště nemůže vzniknout kdekoli. Lokalita musí být pečlivě vybrána a horninový masiv musí splňovat řadu podmínek. Nejdůležitějšími jsou dlouhodobá geologická stabilita, neporušenost, malé proudění podzemních vod a zajiště

také nepropustnost radioaktivního záření. Po zhodnocení vlastností můžeme za vhodné druhy hornin označit žuly (granity), tufy, jílovce, jílové břidlice a soli. V České republice existuje několik seismicky stabilních území s rozsáhlými žulovými masivy, a proto by se v některém z nich mohlo hlubinné úložiště v budoucnosti vybudovat. Na vytipování konkrétní lokality je však třeba provést dlouhodobější měření a průzkumy.

3.4 Části úložiště

Hlubinné úložiště nejsou pouze kontejnery s radioaktivním odpadem hluboko pod zemí, ale skládá se ještě z dalších částí. A to z nadzemního areálu a ze složité soustavy přístupových šachet a tunelů a samotných ukládacích prostorů.

3.4.1 Nadzemní areál

Nadzemní areál si můžeme představit jako soustavu budov, které by tvořily zázemí pro vybudování podzemního areálu a při postupném ukládání jaderného odpadu by zajišťovaly činnost úložiště. Složení budov by mělo být podobné jako u nadzemního areálu hlubinných dolů. Skládalo by ze správních, technických, sociálních a servisních budov, přitom je však z hlediska bezpečnosti nutné, aby byl přísně oddělen areál, kde bude docházet k samotnému kontaktu s vlastním odpadem, od ostatních částí areálu. Počítá se také s tím, že zde by byl jaderný odpad vyjmut ze stávajícího kontejneru a uložen do kontejneru nového, v němž by byl definitivně umístěn do podzemní části areálu. Někdy se bude vyhořelé palivo před přeložením do nového kontejneru ještě mechanicky upravovat.

3.4.2 Přístupové šachty a tunely

Přístupové šachty a tunely by měly sloužit k relativně snadnému vstupu do podzemí. Samotná hloubka, ve které bude úložiště realizováno závisí hlavně na lokálních geologických podmínkách. Předpokládají se hloubky od tří set metrů až do jednoho kilometru. Propojení budou zajišťovat svislé šachty nebo tunely ve tvaru spirály. Obojí bude sloužit jak k přepravě osob a materiálu, tak k ventilaci.

3.4.3 Ukládací prostory

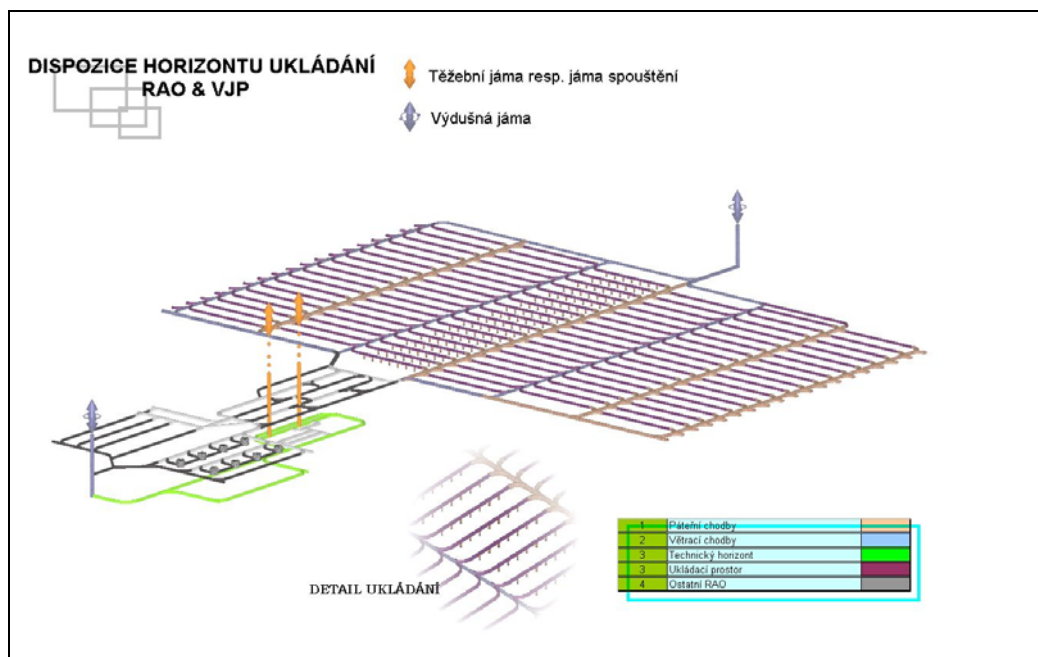
Jednou z nejdůležitějších částí je rozsáhlá soustava chodeb, v nichž dojde k samotnému uložení kontejnerů. Pro představu geometrického uspořádání nám poslouží Obr. 6.

3.4.4 Geometrické vlastnosti ukládacích prostorů

Ve většině projektů se počítá s tím, že kontejnery budou uloženy pod úrovní podlahy tunelů. Samotný tunel by měl být dlouhý 200 metrů a jeho průměr 3 metry, kontejnery by se měly umisťovat 5 metrů od sebe (aby nedošlo k velkému ohřátí okolní horniny i samotných kontejnerů) do vrtů o průměru 1,32 metru. Uvažovaná vzdálenost mezi jednotlivými tunely je 25 metrů. Souhrn geometrických charakteristik hlubinného úložiště popisuje Tab. 1 (viz [5]).

3.4.5 Postup uložení

Počet uložených kontejnerů nezávisí pouze na geometrických rozměrech podzemní části úložiště, ale také na stupni vyhoření paliva a době skladování v meziskladech. Palivo totiž i po vyjmutí z reaktoru produkuje radioaktivní záření a zároveň i teplo, jehož hodnota se postupem času snižuje. Proto se nejprve vyhořelé palivo ochlazuje v bazénech s vodou. V nich je uloženo asi po dobu pěti let, pak je teprve možné ochlazovat kontejnery pouze přirozeným prouděním vzduchu. Po umístění do hlubinného úložiště není palivo ochlazováno ani vzduchem ani vodou a teplo je odváděno prostřednictvím okolní horniny, je proto důležitá vzdálenost mezi jednotlivými kontejnery, aby nedocházelo k přehřívání.



Obr. 6 – Dispozice horizontu ukládání

Tab. 1 – Geometrické vlastnosti úložiště palivových souborů z reaktoru VVER 1000

Parametr	Referenční hodnota VVER 1000
Hloubka vrtu [m]	6150
Průměr vrtu [m]	1,32
Tloušťka bentonitu [m]	0,325
Délka kontejneru [m]	5,05
Poloměr kontejneru [m]	0,35
Tloušťka kontejneru [m]	0,08
Délka tunelu [m]	200
Průměr tunelu [m]	3
Vzdálenost mezi úložnými vrty [m]	5
Vzdálenost mezi tunely [m]	25
Počet palivových souborů	3602
Počet obalových souborů s VJP	1201

3.5 Kontejner

V předchozích částech textu je hojně zmiňován kontejner, co si však můžeme pod tímto pojmem konkrétně představit by měla vysvětlovat tato část kapitoly. Kontejner tvoří jednu z tzv. inženýrských bariér, což znamená člověkem vytvořenou překážku šíření radioaktivního záření. Dalšími inženýrskými bariérami jsou tzv. výplňové a tlumicí materiály, jimiž se utěšňuje kontejner umístěný ve vrtu. Přírodní bariérou je horninový masiv, v němž je úložiště vybudováno.

3.5.1 Význam a popis kontejneru

Základní funkcí kontejneru je izolace vyhořelého paliva. Počítá se, že díky němu bude palivo od okolí dokonale odděleno po dobu tisíc let. Nejdůležitější je, že se k palivu nedostane vlhkost, která by v kombinaci s jaderným palivem mohla způsobit porušení výplňových materiálů a následně i horniny.

Fyzicky si kontejner můžeme představit jako dutý kovový válec o poloměru podstavy 35 centimetrů a výšce 5 metrů. Uvnitř kontejneru jsou umístěny kazety s vyhořelým jaderným palivem.

3.5.2 Vhodné materiály

Důležitým faktorem, který zajistí kontejneru mechanickou odolnost, rezistenci proti všem typům koroze a radioaktivnímu záření vycházejícímu z paliva, je materiál, z něhož bude kontejner vytvořen. Současné době se jsou pro své vlastnosti uvažovány tři druhy materiálů:

- oceli vysoce legované niklem, titanem a chromem
- uhlíkaté oceli
- stálé materiály: zlato, platina, titan a cenově dostupnější měď.

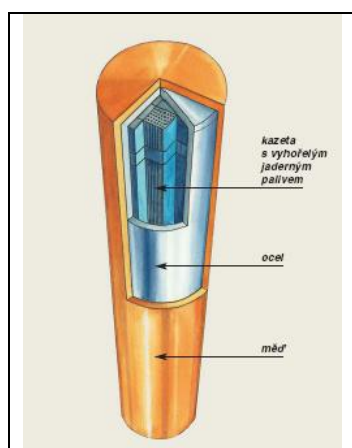
Díky tomu, že každý materiál má jak své výhody, tak samozřejmě nevýhody, budou některé země jako například Švédsko a Finsko nejspíše používat kontejner s dvěma plášti, vnějším z mědi a vnitřním z oceli.

3.5.3 Tepelný výkon

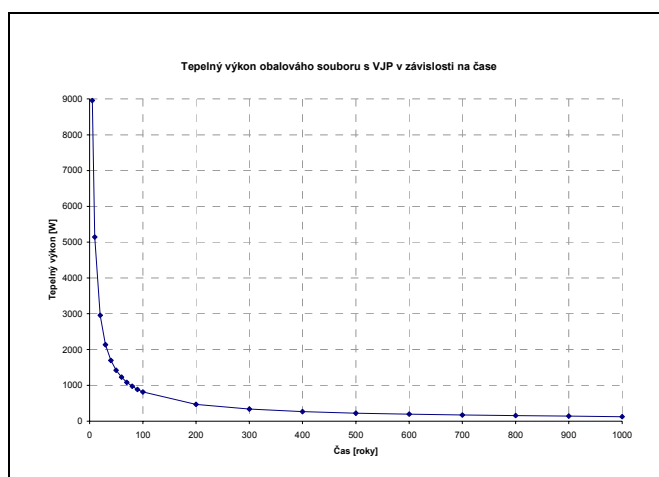
Jak už bylo řečeno, je jaderné palivo po vyjmutí z reaktoru stále aktivní a produkuje radioaktivní záření a spolu s ním také teplo. Konkrétní hodnoty tepelného výkonu paliva po vyjmutí z reaktoru popisuje Tab. 2 a Obr. 8.

3.6 Materiály výplňových a tlumicích bariér

Kontejner je ve vrtu obklopen materiálem, který by měl mít tyto základní vlastnosti. Neměl by propouštět vodu, zároveň by měl vázat radioaktivní látky a také musí dobře odvádět teplo z povrchu kontejneru. Těmito vlastnostem vyhovují jílovité materiály, jako je bentonit a jeho směsi například s křemenným pískem. Navíc samotný bentonit je schopen radioaktivní látky zadržet minimálně po dobu několika desítek let. Fyzikální vlastnosti bariérových materiálů udává Tab. 3.



Obr. 7 – Kontejner



Obr. 8 – Tepelný výkon obalového souboru s VJP v závislosti na čase

Tab. 2 – Tepelný výkon palivového souboru VVER 1000 po vyjmutí z reaktoru

Čas [roky]	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Tepelný výkon [W]	8954	5144	2955	2137	1698	1420	1228	1085	975	888
Čas [roky]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Tepelný výkon [W]	816	469	339	269	225	195	172	155	141	129

Tab. 3 – Fyzikální vlastnosti jednotlivých bariér úložiště

	E [MPa]	μ	Hustota [kgm ⁻³]	Koef. tep. vodivosti	Tep. kapacita [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	Koef. tep. roztažnosti
Granit	66500	0,23	2700	2,7	850	$4,4 \cdot 10^{-6}$
Bentonit	30	0,3	2000	1	2500	$3 \cdot 10^{-6}$
Ocel	210000	0,3	7800	460	45	$12 \cdot 10^{-6}$

3.7 Bezpečnost hlubinného úložiště

Jak už bylo řečeno, úkolem hlubinného úložiště je uchovat radioaktivní odpad do té doby, než se stane pro lidstvo a přírodu neškodným. Projekty hlubinných úložišť jsou navrženy tak, aby vydržely ještě mnohem déle (až miliony let). Je proto potřeba dokázat, že horninové masivy zůstanou po tak dlouhou dobu stabilní, tudíž že je úložiště bezpečné. Důležité je však i určení životnosti samotného kontejneru, v němž bude radioaktivní odpad uložen.

3.7.1 Neměnnost horninového masivu

Zde nás může napadnout, zda je vůbec možné, aby horninový útvar zůstal po tak dlouhou dobu neporušený. Je však nutné vědět, že v hlubinách Země jako by čas plynul jinou rychlostí než na povrchu. A sto tisíc let není vůbec závratná doba, když si uvědomíme, že v horninových masivech nedošlo ke změnám po dobu mnoha desítek miliónů let.

Přírodní reaktor v Oklo

Dalším argumentem bezpečnosti hlubinných úložišť jsou zajímavé přírodní jevy – podzemní reaktory a úložiště. Snad nejznámější přírodní reaktor se nachází v Oklo v africkém státě Gabun. Před dvěma miliony let se v podzemí vytvořila taková koncentrace uranu a vody, že probíhající proces odpovídal štěpné reakci v reaktorech jaderných elektráren. Vědci z celého světa bylo zjištěno, že se produkty jaderného štěpení nepohnuly za dva miliony let z místa, kde vznikly.

Přírodní úložiště pod jezerem Cigar Lake

Před třemi sty tisíci let se pod tímto kanadským jezerem vytvořilo v hloubce 430 metrů unikátní ložisko uranové rudy. Obsahovalo 60% uranu (dnes běžně těžíme rudy do 2% obsahu uranu). Více než milion kubických metrů této rudy se nachází na žulovém podloží a je pokryt různě silnou izolační vrstvou jílu. Skutečnost, že toto rozložení odpovídá koncepci hlubinného úložiště a že k povrchu žádný uran nepronikl, už snad ani nemusíme dodávat.

3.8 Životnost kontejneru

Životnost kontejneru odpovídá trvanlivosti materiálu, ze kterého je kontejner vyroben. Neméně záleží i na prostředí, kde je kontejner uložen a na okolních podmínkách, které jej ovlivňují. Při ověřování výpočtů rychlosti koroze různých kovů můžeme opět použít praktických zkušeností. K tomuto účelu nejlépe poslouží archeologické nálezy kovových předmětů. Určitě nás překvapí, jak zachovalé mohou být tyto předměty i přes dlouhodobý pobyt hluboko pod zemí.

Protože vznik koroze podporuje hlavně volný kyslík, jenž se v hornině v hloubkách okolo pěti set metrů téměř nevyskytuje, a to ani v podzemních vodách, velice se zpomalí korozní proces. Můžeme tedy předpokládat, že takovéto kontejnery vydrží pod zemí statisíce let.

3.9 Projekty hlubinných úložišť ve světě

Mnoho států světa si uvědomuje svoji odpovědnost následujícím generacím, proto připravuje projekty hlubinných úložišť jaderného odpadu. Jedním z důvodů, proč nebylo úložiště plně realizováno, je skutečnost, že vyhořelé palivo musí být ještě několik desítek let po vyjmutí z reaktoru skladováno na povrchu Země.

Za všechny státy připravující hlubinná úložiště můžeme uvést Finsko a Švédsko, kde pokročily přípravy nejvíce. Dále USA, tam by mělo vzniknout úložiště s největší kapacitou. Můžeme zmínit i Francii, Kanadu, Švýcarsko, Belgie a Německo. V některých z těchto států již dokonce existují podzemní laboratoře, v nichž probíhají výzkumy horninového masivu v reálných podmínkách.

4 Vývoj tepla v okolí kontejneru, 2D a 3D model

4.1 Úvod

Cílem této úlohy je porovnání vývoje tepla v okolí jednoho kontejneru s jaderným odpadem, uvažujeme-li 2D a 3D model kontejneru. Nejprve porovnáváme zjednodušené modely bez bentonitu – abychom posoudili vliv dimenze úlohy na výsledky. Model s bentonitem počítáme pro porovnání s již existujícími výpočty. Kvůli zjednodušení v tomto případě nebereme v úvahu skutečnost, že v hlubinném úložišti se všechny kontejnery navzájem tepelně ovlivňují. Vývojem tepla v celém úložišti se budeme zabývat v další kapitole.

Geometrií kontejneru a dalších bariér a jejich dalšími vlastnostmi jsme již probírali v předchozí části. Kontejner je v modelu aproximován válcem z oceli, pro jednodušší konstruování geometrie modelu však není dutý a neobsahuje jednotlivé palivové články. V modelu s bentonitem kontejner navíc obklopuje další válec představující těsnící látku – bentonit. Model kontejneru je umístěn do středu dalšího válce, který představuje část horninového masivu. Tento válec má materiálové vlastnosti granitu a geometrické vlastnosti následující: poloměr podstavy 30 metrů a výšku 60 metrů. Tato vertikální nebo horizontální vzdálenost od středu kontejneru je dostačující, protože zde už můžeme hodnotu tepelného toku považovat za zanedbatelně malou. Fyzikální a tepelné vlastnosti všech materiálů tvořících model popisuje kapitola 3, a to konkrétně Tab. 1 a Tab. 3.

4.2 Geometrie jednotlivých modelů

2D model představuje případ kontejneru o nekonečně velké výšce s blízkým válcovým okolím. Protože tepelný tok ve směru osy z je v tomto případě nulový, může dojít ke zjednodušení na dvě dimenze. 3D model popisuje případ, kdy by měl kontejner konečnou délku. Tento model díky rozdílným tepelným tokům ve směrech jednotlivých souřadných os zjednodušit nemůžeme.

2D model bez bentonitu má velice jednoduchou geometrii. Je to vlastně řez vedený rovinou kolmou na výšku kontejneru ve 3D modelu s nekonečně dlouhým kontejnerem. Geometrii tvoří kruh o poloměru 0,35 metru a mezikruží o poloměrech 0,35 metru a 30 metrů. Přitom obě tyto plochy mají společný střed. Kruh je z oceli, mezikruží má vlastnosti granitu.

2D model s bentonitem je modifikace 2D modelu bez bentonitu. Obsahuje navíc mezikruží tvořené tímto materiálem. Kontejner tedy reprezentuje kruh o poloměru 0,35 metru, bentonit mezikruží o poloměrech 0,35 metru a 0,675 metru a granit mezikruží o poloměrech 0,675 metru a 30 metrů. Všechny plochy mají opět společný střed.

Geometrii 3D modelu představuje válec z oceli o poloměru podstavy 0,35 metru a výšce 5 metrů (kontejner) a druhý válec z granitu o poloměru podstavy 30 metrů a výšce 60 metrů. Menší válec je umístěn osově ve středu většího válce.

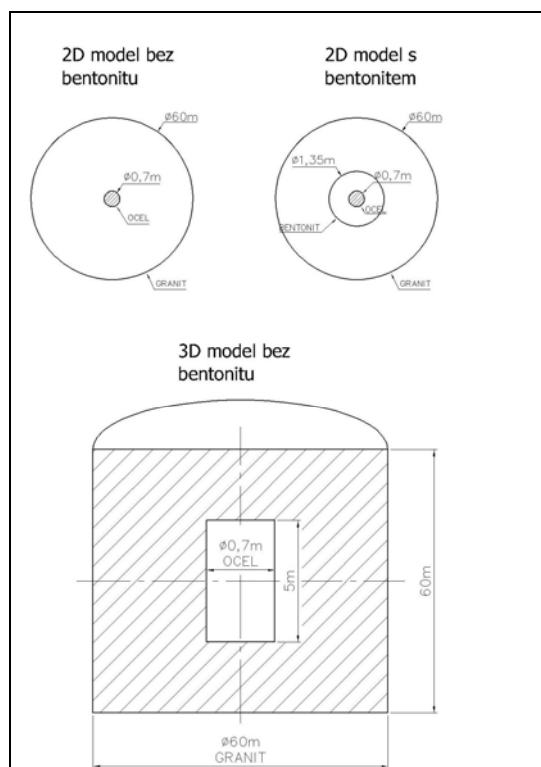
Pro přechod mezi 2D a 3D modelem uvažujeme kontejner o větší výšce, konkrétně 25 metrů. Různými variantami délky kontejneru otestujeme citlivost úlohy na geometrické parametry. Geometrie všech počítaných úloh je uvedena na Obr. 9.

4.3 Zdroj tepla a okrajové podmínky

Kontejner se neukládá do hlubinného úložiště hned po vyjmutí z reaktoru, ale až po delší době. V tomto případě je zvoleným časem třicet let. Pro výpočty používáme přepočítaný tepelný výkon, který je zadáván jako objemový zdroj tepla. (Výkon kontejneru je přepočítán na výkon na metr krychlový kontejneru a do programu Ansys je zadáván jako tabulka časově závislých hodnot. Pro účely zadávání do programu je původní čas posunutý, viz Tab. 4.) Tabulka původního (nepřepočítaného) tepelného výkonu v závislosti na čase je pro srovnání uvedena v kapitole 3.5.3.

Na vnějších okrajích popřípadě plochách je definována okrajová podmínka prvního druhu. Konkrétně teplota 0 °C. Výpočet u 2D modelů je proveden do času 100 let, u 3D modelů do 50 let a to kvůli časové náročnosti samotného výpočtu. Nejpotřebnější z hlediska vyhodnocování výsledků však pro nás bude část dat přibližně do času 30 let.

Ačkoli je počáteční teplota hostitelského prostředí 23,5 °C, ve výpočtech je vždy počáteční podmínka nastavena na nulu. Na kvalitu výsledných dat nemá tato skutečnost žádný vliv, je to pouze opatření kvůli přepisování počáteční podmínky na nulu při opakování výpočtu v programu Ansys. (Pokud například sledujeme výslednou teplotu, je její hodnota pouze zmenšena o hodnotu 23,5 °C.)



Obr. 9 – Geometrie a rozměry modelu úložiště

Tab. 4 – Přepočítaný tepelný výkon palivového souboru VVER 1000 po vyjmutí z reaktoru

Čas [roky]	0	10	20	30	40	50	60	70	170
Tepelný výkon [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]	1111	882	738	638	564	507	461	424	244
Čas [roky]	270	370	470	570	670	770	870	970	
Tepelný výkon [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$]	176	140	117	101	89	81	73	67	

4.4 Výsledky a zhodnocení

Průběhy teplot v závislosti na čase jsou sledovány na jednotlivých rozhraních modelu (rozhraní ocel-granit případně ocel-bentonit, bentonit-granit). Závislosti se u 2D a 3D modelů a jejich modifikací s bentonitem vyznačují podobným tvarem průběhu, ale samozřejmě zde nalezneme odlišnosti – liší maximem dosažené teploty, časem dosažení tohoto maxima a také velikostí teploty na konci simulace. Z těchto údajů můžeme vyvodit různé závěry, například vliv dimenze modelu, vliv výšky kontejneru, ale také vliv přítomnosti bentonitu na vývoj teploty.

4.4.1 2D model

Maximální teplota v tomto případě dospěla na 90,3 °C a to v čase 5,4 roku. V čase 100 let by se teplota podle výpočtu měla pohybovat okolo 37,8 °C. Průběh teploty v čase na rozhraní ocel-granit je znázorněn na Obr. 10.

4.4.2 2D model s bentonitem

V 2D modelu s bentonitem dosáhla teplota na rozhraní ocel-bentonit ještě vyšší hodnoty než v modelu v prvním případě, konkrétně 115,2 °C, za srovnatelně dlouhou dobu 5,2 roku. Vyšší maximální teplotu si můžeme vysvětlit nízkým součinitelem tepelné vodivosti bentonitu, tudíž je teplo odváděno do okolí pomaleji. Proto by teplota byla po 100 letech asi o 10 °C vyšší než v případě bez bentonitu. Na rozhraní bentonit-granit by teplota dosáhla maxima za nepatrně delší dobu než na prvním rozhraní, za 6,2 roku teploty 76,1 °C. Přehled všech maximálních teplot pro dvojrozměrné modely udává Tab. 5, v Tab. 7 jsou uvedeny teploty na rozhraních v čase 50 let a graf závislosti teploty na čase na obou rozhraních je zobrazen na Obr. 10 spolu s grafem závislosti teploty na čase ve 2D modelu.

Obr. 12 ukazuje vývoj teploty v závislosti na vzdálenosti od středu kontejneru do vzdálenosti 30 metrů (poloměr většího kruhu) a to v čase dosažení maximální teploty. Je patrné, že průběhy teplot u modelu bez bentonitu i s bentonitem jsou od vzdálenosti 0,675 metru téměř totožné. Liší se maximální teplotou a z detailu na Obr. 13 můžeme usoudit, že rozdílný průběh od vzdálenosti 0,35 metru do 0,675 metru odpovídá v modelu bentonitu.

4.4.3 3D model

V grafu na Obr.11 jsou vyneseny teploty v závislosti na čase jak pro 3D modely, tak z důvodu snadnějšího porovnání i pro 2D model bez bentonitu. Ve 3D modelu s kontejnerem o výšce 5 metrů je dosaženo maximální teploty 52 °C za velmi krátkou dobu 1,9 roku. Pokud sledujeme časovou závislost teploty pro trojrozměrný model s výškou kontejneru pětikrát delší, vidíme, že maximální teploty 68,3 °C dosáhne za dvojnásobnou dobu 3,8 roku. Tento čas je však stále nižší než u obou modifikací dvojrozměrných modelů. Přehled maximálních teplot a příslušných časů udává Tab.6.

Jinak se průběhy pro 2D i 3D modely vyznačují rozdílnou strmostí, závislost teploty na čase u 2D modelu klesá nejrychleji, nejpomaleji naopak teplotní závislost 3D modelu s delším kontejnerem. Kdybychom strmost průběhu sledovali i u 2D modelu s bentonitem, zjistíme, že je u ještě o něco vyšší než u výše zmiňovaných případů. Rychlost klesání závislostí jsme určovali pomocí rozdílu teplot ve dvou různých časových okamžiků. V Tab. 7 jsou uvedeny teploty v čase 50 let pro všechny čtyři počítané modely.

Z grafů na Obr. 12 a Obr. 13 můžeme posuzovat rychlost klesání teploty v závislosti na vzdálenosti od středu kontejneru (ve 3D modelu je tato vzdálenost uvažována na ose příčného řezu modelem, který je veden v polovině výšky většího válce). Strmost těchto grafů určuje rychlost klesání teploty v čase dosažení maximální teploty. U 3D modelu s kontejnerem s menší výškou klesá teplota rychleji, oba dvojrozměrné modely mají strmost průběhu výrazně nižší. Průběh teploty pro 3D model s kontejnerem o výšce 25 metrů se podle předpokladu vyskytuje opět mezi oběma výše zmiňovanými závislostmi, ale jeho strmost je výrazně menší než u trojrozměrného modelu s kratším kontejnerem.

Tab. 5 – Maximální teploty pro 2D model

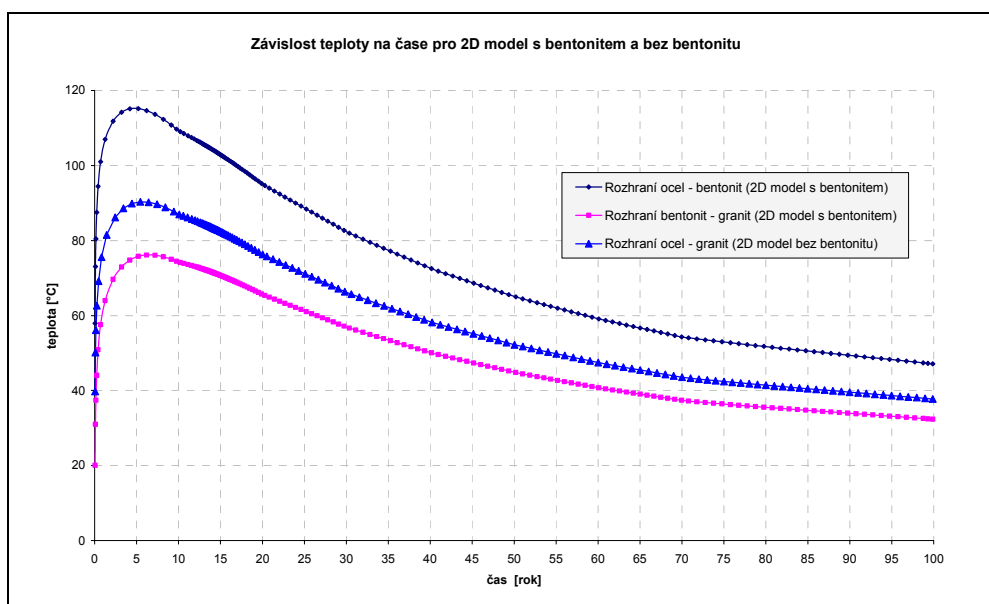
	bez bentonitu		s bentonitem	
	teplota[°C]	čas [roky]	teplota[°C]	čas [roky]
1. rozhraní (ocel - granit / ocel – bent.)	90,3	5,4	115,2	5,2
2.rozhraní (bent.- granit)	–	–	76,1	6,2

Tab. 6 – Maximální teploty pro 3D model a 2D model bez bentonitu

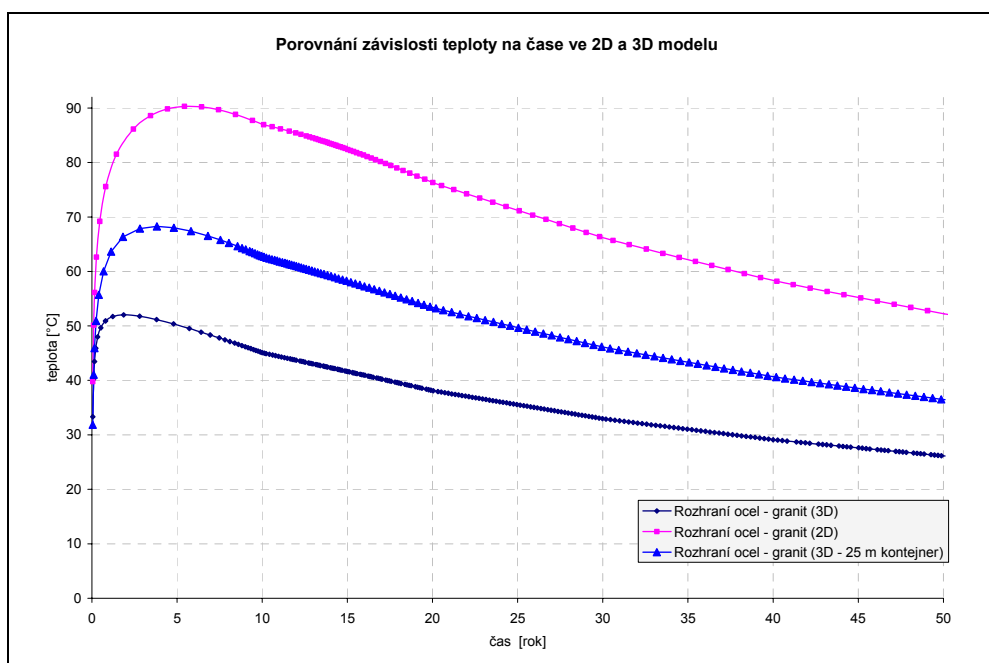
	5 m kontejner		25 m kontejner		nekonečně dlouhý kontejner	
	teplota [°C]	čas [roky]	teplota [°C]	čas [roky]	teplota [°C]	čas [roky]
rozhraní ocel - granit	52,0	1,9	68,3	3,8	90,3	5,4

Tab. 7 – Teplota v čase 50 let

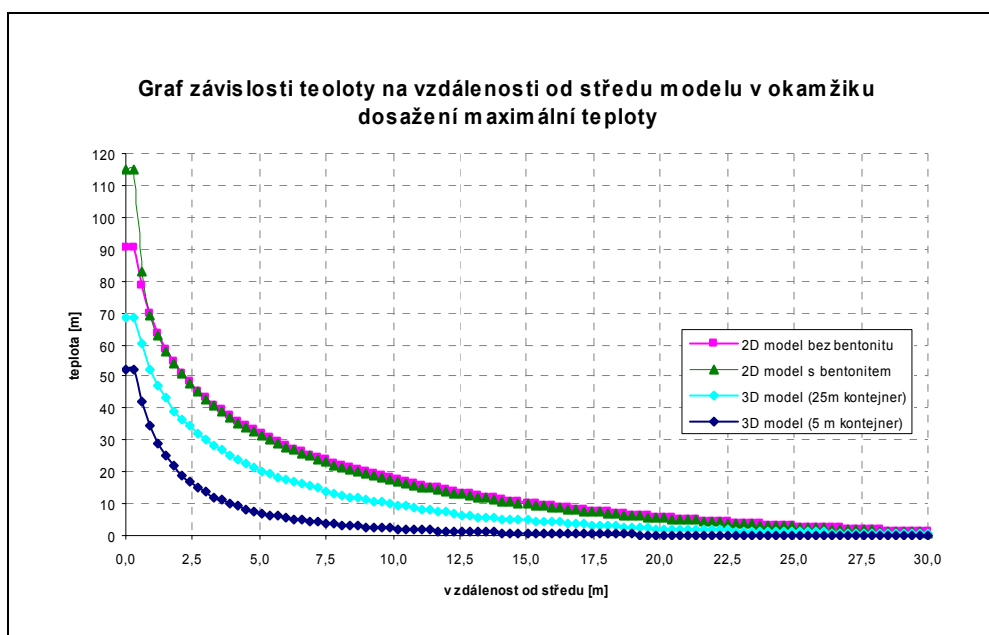
	2D		3D	
	teplota [°C]		teplota [°C]	
	bez bentonitu	s bentonitem	5 m kontejner	25 m kontejner
1. rozhraní (ocel - granit / ocel – bent.)	52,2	65,0	26,1	36,4
2.rozhraní (bent.- granit)	–	44,8	–	–



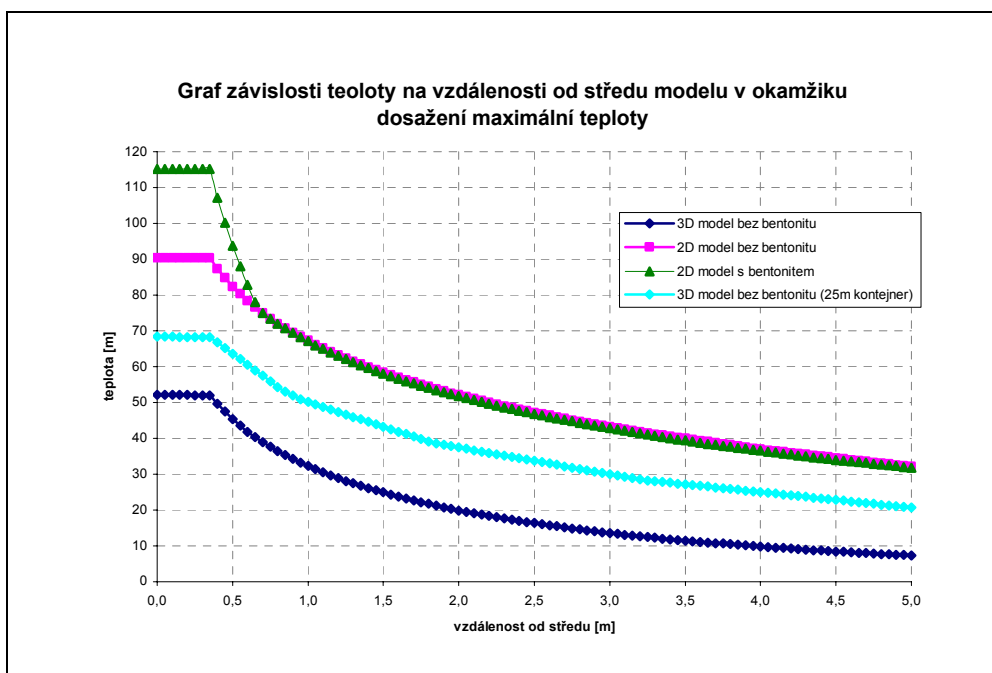
Obr. 10 – Graf závislosti teploty na čase ve 2D modelech



Obr. 11 – Graf závislosti teploty na čase ve 2D a 3D modelech



Obr. 12 – Rozložení teploty v závislosti na vzdálenosti od zdroje (0 až 30 m)



Obr. 13 – Detail: rozložení teploty v závislosti na vzdálenosti od zdroje (0 až 5 m)

5 Vývoj tepla v hlubinném úložišti jako celku

5.1 Úvod

V následujících dvou příkladech je řešen vývoj tepla v okolí celého hlubinného úložiště. Tím, že bereme v úvahu velké množství kontejnerů, dochází k jejich vzájemnému ovlivňování. Vývoj tepla bude odlišný od vývoje u modelů jednotlivých kontejnerů v předcházející kapitole. Oproti realitě zde dochází k několika zjednodušením. Ve skutečnosti se hlubinné úložiště bude zaplňovat kontejnery postupně, ale v modelech uvažujeme úložiště hned od prvního okamžiku plné. Další aproximace spočívá v tom, že model není rozdělen na jednotlivé kontejnery, ale je brán jako homogenní deska. Počítáme dva případy – jednorozměrný a dvojrozměrný model.

První případ – jednorozměrný model představuje úložiště jako kvádr o výšce rovnající se výšce jednoho kontejneru a nekonečně velkých rozměrech v obou horizontálních směrech. Druhou úlohou je model úložiště jako kvádru s konečnými rozměry. (Rozměry kvádru si můžeme dopočítat, protože známe počet kontejnerů v úložišti a jednotlivé vzdálenosti mezi nimi.) Jednou možností by bylo namodelovat geometrii této úlohy jako klasický 3D model. Vzhledem k omezenému počtu prvků sítě v akademické licenci Ansysu by nebyla síť dostatečně jemná. Proto je výhodnější reprezentace dvojrozměrným osově symetrickým modelem, která je ekvivalentní z hlediska velikosti objemu. Osově symetrický model si můžeme představit jako část válce, který by měl stejný objem jako výše zmiňovaný kvádr konečných rozměrů. Následuje výpočet poloměru podstavy osově symetrického modelu:

$v = 5\text{ m}$	výška jednoho kontejneru	V_1	objem desky
$n = 3511$	počet kontejnerů	V_2	objem desky osově symetrické
$x = 5\text{ m}$	vzdálenost jednotlivých kontejnerů	d	délka strany desky
$l = 25\text{ m}$	vzdálenost tunelů	r	poloměr podstavy válcové desky

Nejprve spočítáme délku hrany kvádru s čtvercovou podstavou a výškou rovnající se výšce jednoho kontejneru pomocí známých vzdáleností a počtu jednotlivých kontejnerů v hlubinném úložišti:

$$n = \frac{d}{x} \cdot \frac{d}{l} \quad (28)$$
$$d = \sqrt{n \cdot x \cdot l} = 662\text{ m}$$

Jak již bylo řečeno, objemy kvádrů a desky s kruhovým půdorysem by se měly rovnat, proto pro získání poloměru podstavy válce stačí vypočítat tuto jednoduchou rovnici:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \\ d^2 \cdot v &= r^2 \cdot v \cdot \pi \\ r &= d \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi}} = 373,5 \text{ m} \end{aligned} \quad (29)$$

5.2 Geometrie jednotlivých modelů

Uspořádáním a geometrickými rozměry koncepce hlubinného úložiště jsme se zabývali již v kapitole 3.4, v této kapitole uvedeme už jen geometrii samotných modelů.

1D model je tvořen úsečkou, u které navíc uvažujeme symetrii s osou procházející jejím středem, proto stačí počítat pouze s její polovinou. Úložiště tím pádem aproximuje úsečka o délce 2,5 metru a okolí představuje úsečka dlouhá 27,5 metrů (obě úsečky jsou rovnoběžné a mají společný jeden – krajní bod) viz Obr. 14. Kratší úsečka má materiálové vlastnosti oceli, okolí tvoří granit.

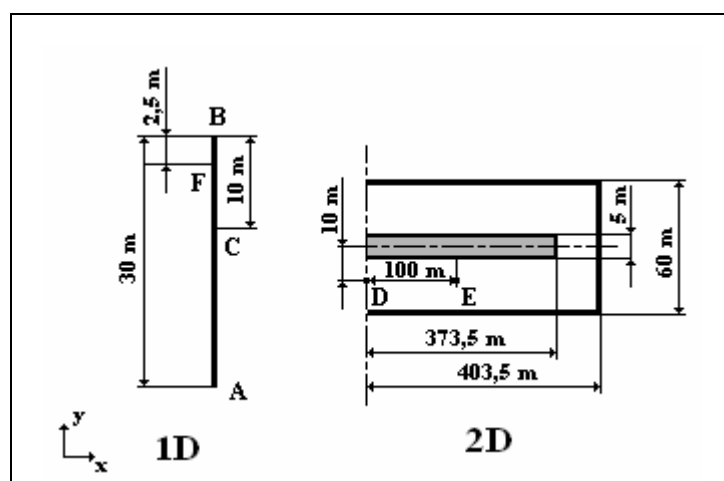
Model s úložištěm jako kvádrem konečných rozměrů můžeme převést na ekvivalentní osově symetrický model. Tento model lze dále zjednodušit na dvojrozměrnou úlohu. Geometrii okolí v osově symetrickém případě reprezentuje deska o kruhovém půdorysu s vlastnostmi granitu. Proto jej lze ve 2D znázornit jako obdélník o rozměrech 403,5 metru a 60 metrů s osou rotace procházející jeho kratší stranou. Uvnitř, podle Obr. 14, je obdélník o rozměrech 373,5 metru a 5 metrů aproximující samotné úložiště. Zvolené materiálové vlastnosti odpovídají oceli. Fyzikální vlastnosti jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tab. 3, v kapitole 3.

5.3 Zdroj tepla a okrajové podmínky

I v těchto dvou příkladech řešíme nestacionární úlohu a stejně jako v případě jednotlivých kontejnerů je zvoleno, že se kontejnery budou ukládat do úložiště po třiceti letech. Závislost tepelného výkonu na čase proto musíme opět přepočítat, obdobně jako v kapitole 4.3. (Zde je to tepelný výkon na jeden metr krychlový zhomogenizovaného úložiště a je zadáván jako tabulka časově závislých hodnot posunutých o třicet let oproti původním hodnotám, viz Tab. 8.) Konkrétně byl zadán jako zdroj tepla na úsečku BF u 1D modelu a jako plošný zdroj na plochu představující úložiště ve 2D modelu. Tabulka tepelného výkonu v závislosti na čase je u obou případů shodná, protože se do

Ansysu zadává výkon na metr krychlový nezávisle na dimenzi zdroje. Výpočty jsou provedeny do času 150 let, ale zajímavé pro nás budou průběhy teplot do času 50 let.

U 1D modelu je zadána okrajová podmínka prvního druhu v krajním bodě *A* (viz Obr. 14), 2D model má nastavenou tu samou podmínku na všech vnějších stranách kromě té, kterou prochází osa symetrie. Její hodnota je konkrétně 0 °C. Ze stejných důvodů jako v minulé kapitole je počáteční podmínkou teplota 0 °C a ne předpokládaná teplota prostředí (23,5 °C). Kvalitu výsledků tato volba nijak nezmění.



Obr. 14 – Geometrie modelu hlubinného úložiště jako celku

Tab. 8 – Přepočítaný tepelný výkon palivového souboru VVER 1000 po vyjmutí z reaktoru

Čas [roky]	0	10	20	30	40	50	60	70	170
Tepelný výkon [W·m ⁻³]	3,424	2,721	2,275	1,968	1,738	1,562	1,423	1,307	0,751
Čas [roky]	270	370	470	570	670	770	870	970	
Tepelný výkon [W·m ⁻³]	0,543	0,431	0,361	0,312	0,276	0,248	0,226	0,207	

5.4 Výsledky a zhodnocení

U jednorozměrného modelu sledujeme teplotu v bodě *C*, což odpovídá vzdálenosti 7,5 metrů od pomyslného rozhraní desky a okolí. V 2D modelu zkoumáme teplotu v bodě ležícím na vertikální ose symetrie ve vzdálenosti 23,5 metru od vnější strany obdélníku (bod *D*), přitom nezáleží jestli od strany horní nebo dolní, protože rozložení teploty je symetrické. A pro porovnání sledujeme ještě teplotu v bodě o horizontální souřadnici posunutou o sto metrů ve směru osy *x* a o souřadnici *y* stejné jako u bodu *D* (bod *E*). Všechny zmíněné body jsou pro lepší přehlednost zobrazeny na Obr. 14.

Průběhy závislosti teploty na čase pro oba počítané modely jsou zobrazeny na Obr. 15. Už na první pohled je zřejmé, že oproti úlohám s jedním kontejnerem je maximální teplota mnohem nižší. Jedním z důvodů je fakt, že body, kde teplotu sledujeme, leží ve větší vzdálenosti od středů pomyslných kontejnerů. Ale hlavním a důležitějším rozdílem je pomalejší dosažení maxima teploty. Oproti úlohám z kapitoly 4 je čas nejvyšší teploty posunutý zhruba o 15 let.

5.4.1 1D model

Průběh závislosti teploty na čase v jednorozměrném modelu je také uveden na Obr. 15. Maximum teploty v tomto příkladu se v bodě C pohybovalo okolo $42,5^{\circ}\text{C}$ a bylo dosaženo v čase 19,5 roku.

5.4.2 2D model

Podle předpokladů by měla být maximální dosažená teplota v případě osově symetrického modelu nižší než u 1D modelu s úložištěm ve tvaru kvádrů s nekonečnými rozměry. (Analogicky vycházela úloha s jedním kontejnerem s konečnou a nekonečnou výškou.) U dvojrozměrného modelu se však maximální teplota ($41,9^{\circ}\text{C}$ v čase 18,5 roku) skoro neliší od nejvyšší teploty modelu jednorozměrného. Důvodem nejspíše bude příliš malé okolí granitové horniny. Okrajová podmínka je tedy nastavena příliš blízko k desce představující úložiště.

Pro bod E vychází maximální teplota o něco málo nižší než pro bod D , asi $40,4^{\circ}\text{C}$, a to ve stejném čase 18,5 roku. Nižší teplota je dána větším vlivem okrajové podmínky předepsané na svislé straně modelu než pro bod ležící na ose symetrie. Tab. 9 prezentuje maxima dosažených teplot obou modelů v bodech C , D , E .

Teplota ve všech výše uvedených bodech u obou modelů se v čase 150 let pohybuje zhruba okolo 16°C , jak je uvedeno v Tab. 10.

Pro porovnání s již existujícími výpočty je na grafu na Obr. 15 vynesena závislost nazvaná „Referenční závislost“. Tato data jsou výsledkem dříve počítaného periodického modelu. Můžeme vidět, že v periodickém modelu maximum teploty dosahuje přibližně stejné teploty ($40,7^{\circ}\text{C}$), čas jejího dosažení je však o několik let delší, konkrétně 23,3 roku.

Na grafu na Obr. 16 je zobrazena závislost teploty na vzdálenosti v čase dosažení maximální teploty. U 1D modelu tento graf tvoří teploty v jednotlivých uzlech modelu, u 2D modelu jsou to teploty v uzlech ležících na vertikální ose symetrie.

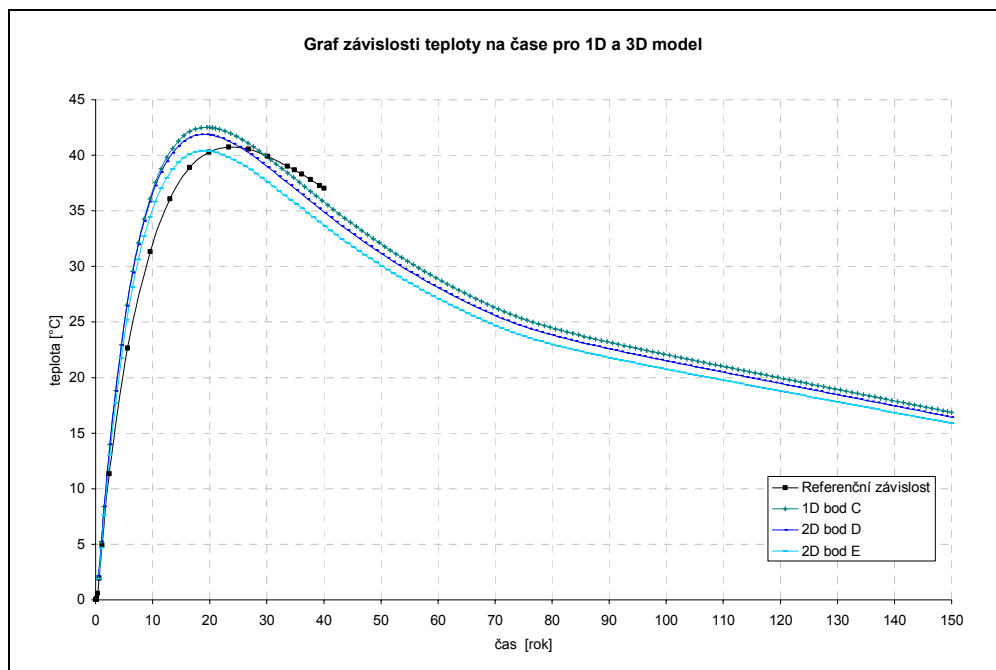
Průběhy teplot obou modelů se od sebe odlišují jenom minimálně. Od vzdálenosti 2,5 metru teplota klesá lineárně, jako by se jednalo o ustálený stav. Důvodem budou zřejmě opět příliš blízké okraje modelu od desky představující úložiště. Dále můžeme vidět, že maximální teplota v celém modelu, tedy v bodě o 10 metrů menší souřadnici y než mají sledované body C , D , E , dosáhla teplota v jednorozměrném modelu $58,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ve dvojrozměrném modelu $57,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tab. 9 – Maximální teplota a čas jejího dosažení

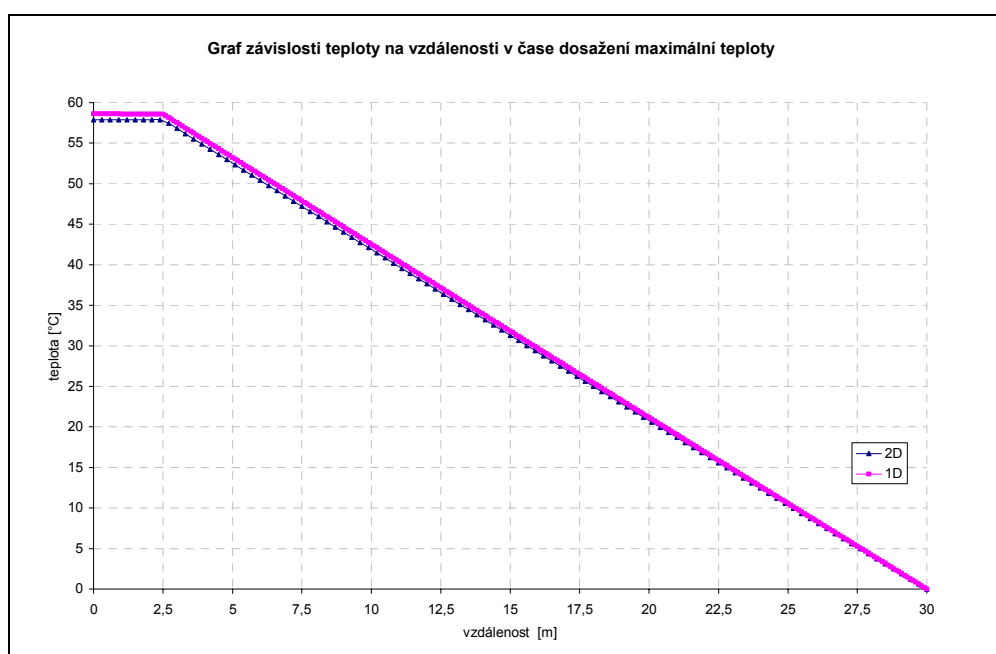
model	maximum teploty [$^{\circ}\text{C}$]	čas dosažení maxima [roky]
1D bod C	42,5	19,5
2D bod D	41,9	18,5
2D bod E	40,4	18,5
referenční závislost	40,7	23,3

Tab. 10 – Teplota v čase 150 let

model	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
1D bod C	16,9
2D bod D	16,4
2D bod E	15,9



Obr. 15 – Graf závislosti teploty na čase pro 1D a 3D model úložiště



Obr. 16 – Rozložení teploty v závislosti na vertikální vzdálenosti od zdroje

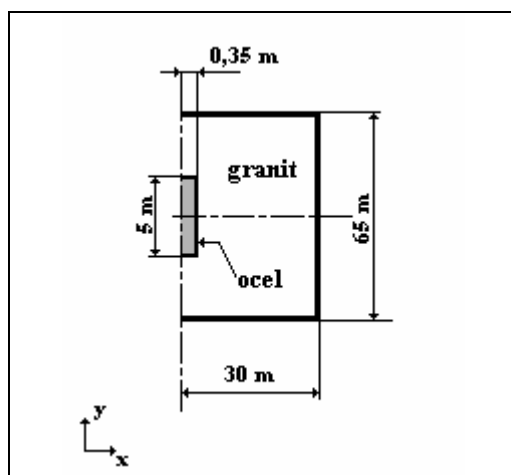
6 Úloha termoelasticity

6.1 Úvod

Poslední vypracovávaná úloha se od dvou předcházejících sad příkladů poněkud liší. Zatímco dosud jsme řešili úlohy vývoje tepla, v následujícím příkladu se budeme zabývat termoelasticitou. Jak už bylo řečeno termoelasticita znamená, že se vlivem působení tepla vytváří v tělesech napětí – řešit tedy budeme sdruženou úlohu. V přístupu k programu Ansys to znamená, že nejprve vyřešíme klasickou nestacionární úlohu vedení tepla a teprve potom se zaměříme na úlohu statiky. Z důvodu zjednodušení přípravy geometrie modelu nebereme v úvahu bentonit.

6.2 Geometrie úlohy

Pro lepší zobrazení výsledků této úlohy by bylo výhodnější zvolit klasickou trojrozměrnou geometrii, ale jelikož práce v programu Ansys ve třech dimenzích není vždy úplně názorná a jednoduchá, použijeme opět dvojrozměrný osově symetrický model. Jeho geometrie zcela odpovídá 3D modelu z kapitoly 4, jen není znázorněna klasicky ve třech dimenzích, ale jako polovina dvojrozměrného osově symetrického modelu s osou procházející vertikálně středem kontejneru. Kontejner reprezentuje obdélník o stranách 0,35 metru a 5 metrů. Umístěn je tak, že kratší strana leží vodorovně a delší strana náleží svislé ose souměrnosti modelu, podle Obr. 17. Okolí je jakýsi šestiúhelník, který vznikl „vyříznutím“ kontejneru z obdélníku s vodorovnou stranou o délce 30 metrů a svislou stranou, která měří 65 metrů. Modelu kontejneru jsou přiřazeny materiálové vlastnosti oceli, okolí materiálově reprezentuje granit.



Obr. 17 – Geometrie k úloze termoelasticity

6.3 Postup řešení

Protože se jedná o jiný typ úlohy než ve dvou předcházejících případech, bude odlišný i postup řešení. Zjednodušeně lze říci, že nejprve vyřešíme nestacionární úlohu vedení tepla a poté budeme řešit úlohu statiky, ve které použijeme výsledky z tepelné analýzy. Protože statická analýza bude stacionární, stačí nám z výsledků úlohy vedení tepla pouze hodnoty teploty v jednom určitém čase. Zvolené rozložení teploty v tomto příkladu je v časový okamžik, kdy dosáhne maxima teplota na rozhraní ocel-granit v polovině výšky kontejneru.

K tomuto postupu je v Ansysu nutné vytvořit jakási fyzikální „prostředí“, jedno tepelné, druhé strukturální s odpovídajícími materiálovými vlastnostmi. V těchto prostředích se automaticky přiřadí modelům elementy, podle typu úlohy. Geometrii a síť konečných prvků modelu stačí vytvořit jednu pro obě části úlohy. Poté pouze načteme tepelné prostředí, nastavíme všechny potřebné okrajové a počáteční podmínky a vyřešíme úlohu vedení tepla. Přepneme do strukturálního prostředí, opět nastavíme potřebné podmínky a také rozložení teploty ze souboru výsledků tepelné analýzy. A můžeme spustit řešení.

6.4 Úloha vedení tepla – zdroj tepla a okrajové podmínky

Nastavení okrajových i počátečních podmínek a zdroje tepla je v tomto příkladu dost podobné úloze vedení tepla v kapitole 4, proto ho nebudeme zde příliš rozvádět. Tepelný zdroj je zde zadaný jako zdroj na plochu kontejneru (menšího obdélníku), přitom jeho časově závislé hodnoty jsou stejné jako v Tab. 4. Počáteční podmínku jsme opět nastavili na 0 °C. Okrajová podmínka prvního druhu – teplota 0 °C přísluší vnějším vodorovným a pravé svislé straně modelu představujícímu granit. Výpočet nemusíme provádět v dlouhém časovém intervalu, stačí, aby bylo dosaženo maximální teploty na rozhraní kontejner-okolí, kterou budeme potřebovat v druhé části úlohy. S dosti velkou rezervou můžeme natavit konečný čas řešení na 6 let.

6.5 Úloha statiky – okrajové podmínky

Ve statické části úlohy nastavíme pouze okrajové podmínky, napětí bude vznikat vlivem teploty. Na vodorovných vnějších stranách modelu je nadefinována Dirichletova okrajová podmínka, přesněji nulové posunutí ve směru osy y . Navíc je ještě

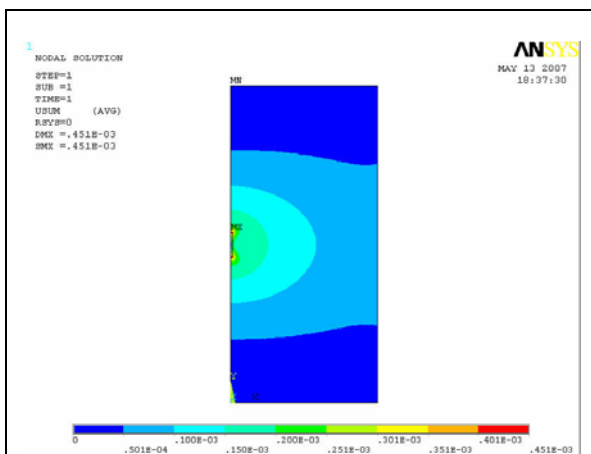
předepsáno nulové posunutí ve směru os x a y v jednom bodě – v levém horním rohu modelu. Na pravém vnějším svislém okraji modelu je předepsán nulový tlak. Nakonec je zadáno rozložení teploty. Jak již bylo řečeno použijeme rozložení teploty při dosažení maxima na rozhraní ocel-granit z výsledků tepelné analýzy. Konkrétně v čase 1,92 roku, což také plně odpovídá 3D modelu. Poté se úloha vyřeší jako stacionární analýza.

6.6 Výsledky a zhodnocení

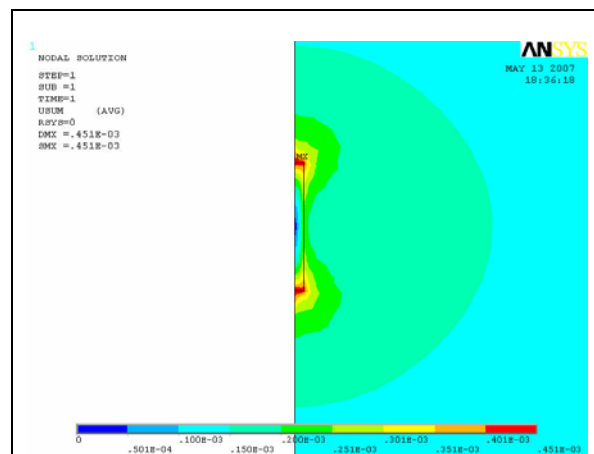
Výsledky úlohy vedení tepla zde nejsou hlavním předmětem zkoumání, ale přeci jen je můžeme využít pro zpětnou kontrolu. Průběh teploty v závislosti na čase na rozhraní kontejner-okolí vyšel shodný s průběhem teploty na stejném rozhraní pro 3D model s jedním kontejnerem z kapitoly 4. Předpokladem pro shodnost výsledků je fakt, že řešíme stejnou úlohu se stejnou geometrií, která je pouze jinak znázorněna. (Stejně samozřejmě zůstaly i okrajové a počáteční podmínky.)

V programu Ansys je možné zobrazení velkého množství mechanických veličin. Zhodnotíme jich pouze několik. Z Obr. 18 – celkového posunutí můžeme určit posunutí v rámci celého modelu. Obr. 19 pak zobrazuje detail, blízké okolí kontejneru. Protože bylo v okrajových podmínkách zadáno nulové posunutí ve směru osy y , pnutí kontejneru způsobilo malé posunutí granitu ve směru osy x . Největších hodnot je však dosaženo nad a pod kontejnerem, jeho střed zůstal na svém místě. Z barevné škály pod modelem můžeme určit, že nejvyšší hodnota posunutí je velice malá. Dosahuje hodnoty zhruba půl milimetru.

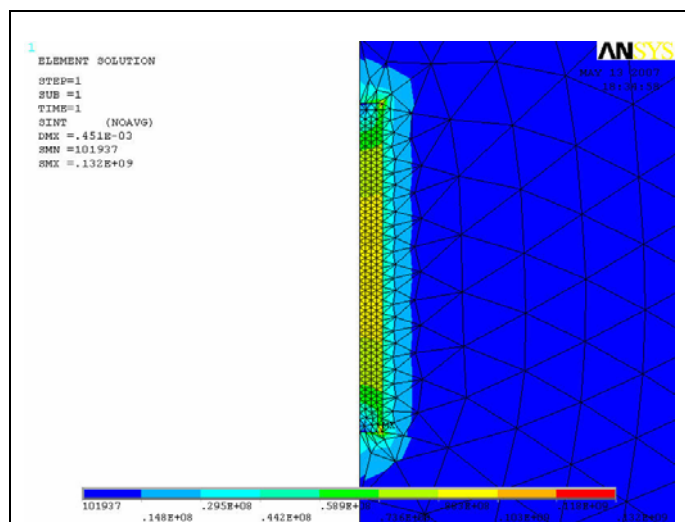
Na Obr. 20 můžeme vidět intenzitu napětí jednotlivých elementů modelu. Protože ve zbylé části modelu je hodnota napětí velice malá, stačí nám ke zhodnocení detail modelu v okolí kontejneru. Nejvyšších hodnot dosahuje napětí ve středu kontejneru, směrem k jeho hornímu a dolnímu okraji intenzita klesá. Na Obr. 21 je zobrazena intenzita deformace, opět detail. Podle barevné škály můžeme určit, že nejvyšších hodnot dosahuje u okrajů kontejneru.



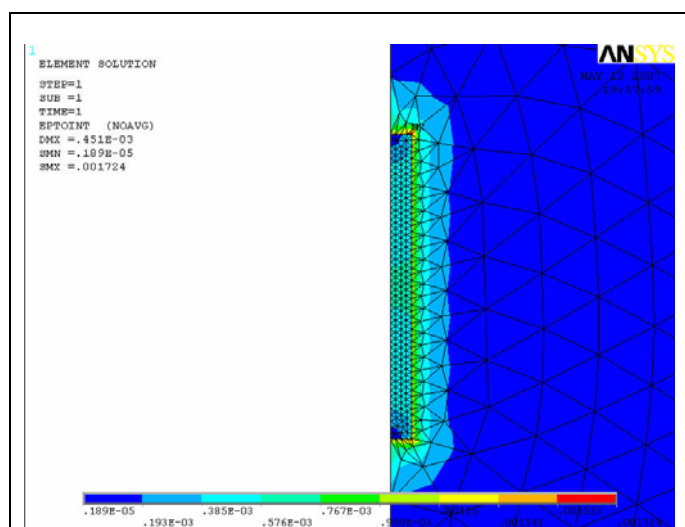
Obr. 18 – Celkové rozložení posunutí



Obr. 19 – Rozložení posunutí – detail



Obr. 20 – Detail – intenzita napětí



Obr. 21 – Detail – intenzita deformace

Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo vypracovat výpočty rozložení tepla v okolí hlubinného úložiště radioaktivního odpadu a vzorovou úlohu termoelasticity. Příklady vedení tepla byly řešeny pro jednotlivý kontejner s nejbližším okolím i pro celé úložiště.

U úloh s jedním kontejnerem byla měněna výška kontejneru. Byly spočítány nestacionární příklady s kontejnerem s nekonečnou výškou, s výškou 5 metrů a 25 metrů, všechny bez bentonitu. Navíc ještě jeden model s nekonečně vysokým kontejnerem s bentonitem.

Sledovány byly průběhy teploty v čase na rozhraních modelů a závislosti teploty na vzdálenosti v jednom časovém okamžiku. Obecně můžeme říci, že čím větší je výška kontejneru, tím vyšší bude maximální dosažená teplota a zároveň se zvýší i doba dosažení maxima na jednotlivých rozhraních. Bentonit navíc, jako těsnicí látka, způsobuje další zvýšení maxima teploty kontejneru. Doba dosažení tohoto maxima na rozhraní kontejner-bentonit v porovnání s rozhraním kontejner-granit (pro odpovídající model bez bentonitu) zůstává přibližně stejná. Podle strmostí grafů závislosti teploty na příčné vzdálenosti od středu kontejneru k okraji modelu jsme určili, že u modelů s menší výškou kontejneru klesá teplota se vzdáleností výrazně rychleji než u modelů s nekonečně velkou výškou. Bentonit v tomto případě rychlost klesání teploty se vzdáleností u modelů s kontejnery s nekonečnou výškou příliš neovlivní.

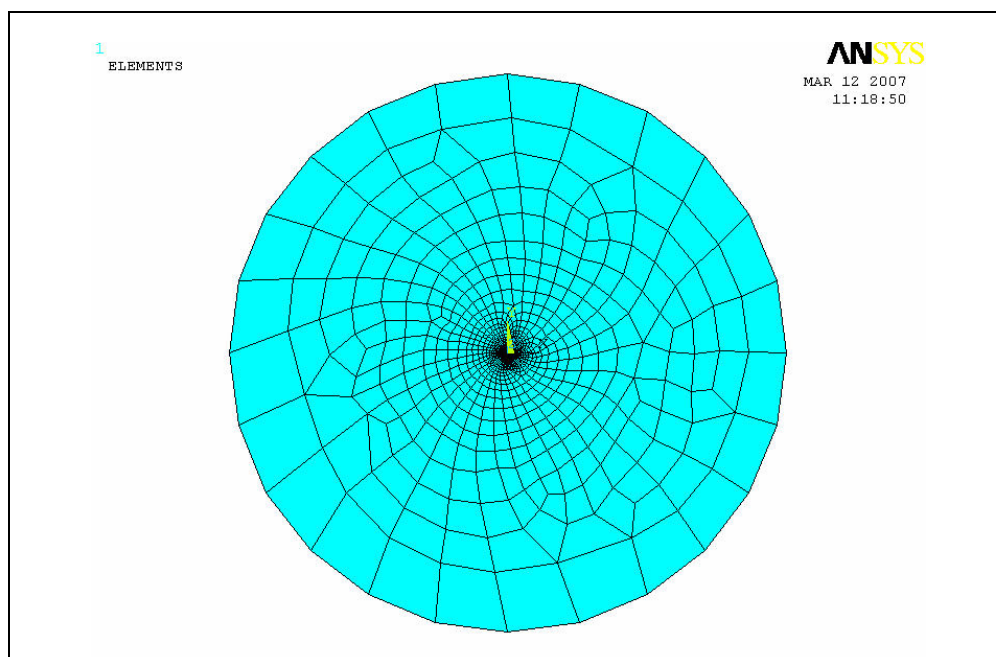
Dále byly počítány modely celého hlubinného úložiště. Úložiště bylo aproximováno jednak jako homogenní kvádr s nekonečně velkými rozměry v obou horizontálních směrech a konečně velkou výškou a v druhém případě jako homogenní kvádr konečných rozměrů. Teplota se sledovala s určitým výškovým odstupem v granitovém okolí úložiště. Můžeme říci, že výsledné závislosti teploty na čase vyšly velice podobně referenčním výsledkům dříve spočítaným pro periodický model. Ale pokud bychom sledovali rozdíly v maximech dosažených teplot pro kvádr konečných a nekonečných rozměrů, zjistíme, že se příliš neliší. Důvodem bude nejspíše skutečnost, že okraje modelu – okolí z granitu bylo zvoleno příliš malé.

Poslední vypracovaná úloha řeší problém termoelastivity. Je zvolen model s jedním kontejnerem o klasické délce a zkoumá se vliv teploty na vznik posunutí a deformací. V modelu se neuvažuje bentonit, který by jako tlumicí látka případně větší deformace „pohltil“, tak že by granit téměř neovlivnily. Přesto teplota v okolí jednoho kontejneru nedosáhne tak velkých hodnot, aby bylo vzniklé posunutí nějak výrazné – maximální posunutí v modelu nedosáhlo ani hodnoty půl milimetru. Nejvyšších hodnot dosahovalo

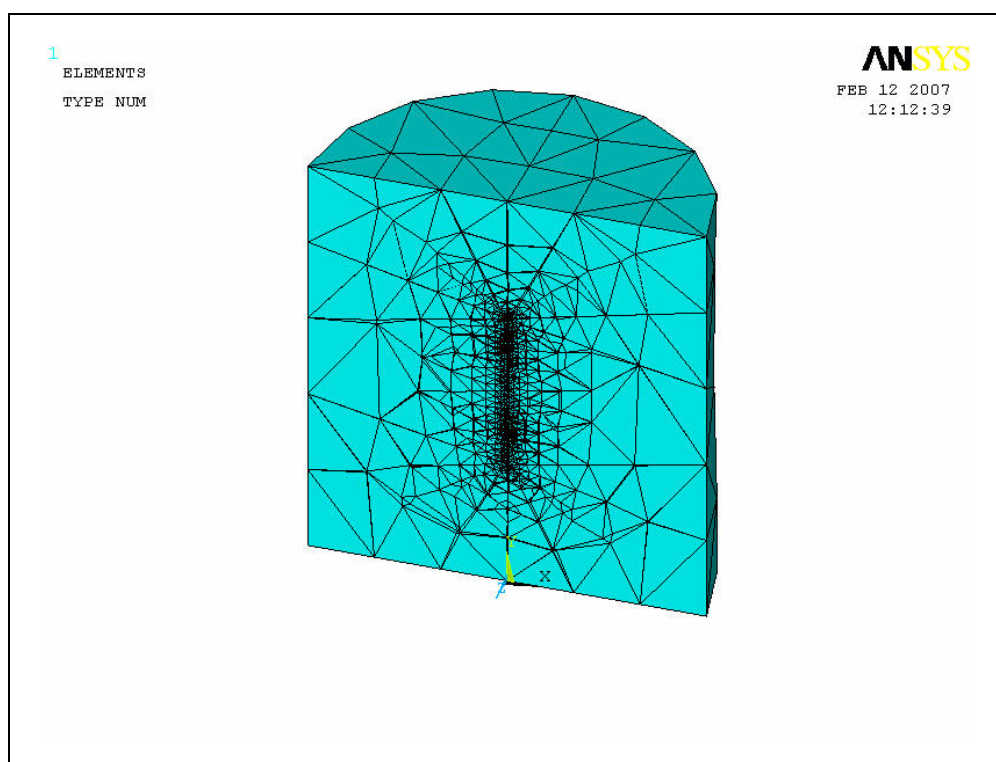
v blízkosti vodorovných okrajů kontejneru, naopak v jeho středu bylo téměř nulové. Dále jsme zkoumali intenzitu napětí a deformace kontejneru a jeho blízkého okolí. Podle graficky zobrazených výsledků je nejvyšší hodnota intenzity napětí u středu kontejneru, směrem k horní a dolní podstavě klesá. Intenzita deformace je nejvyšší na vnějších okrajích modelu kontejneru.

Přílohy

Příloha A Ukázky modelů se sítí konečných prvků

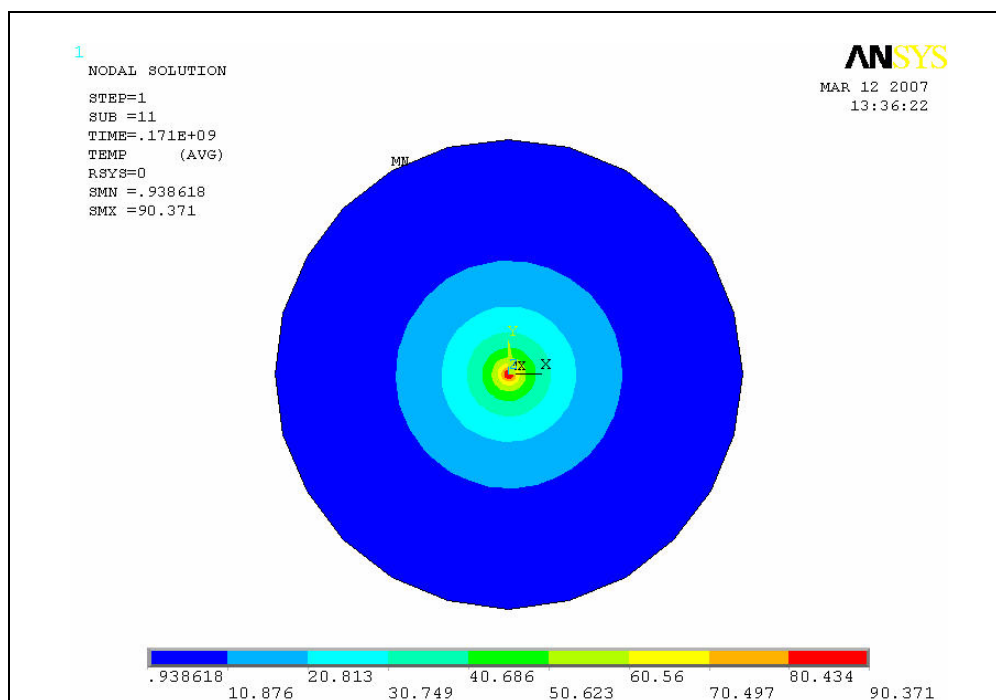


A.1 Sít' konečných prvků pro 2D model jednoho kontejneru s bentonitem

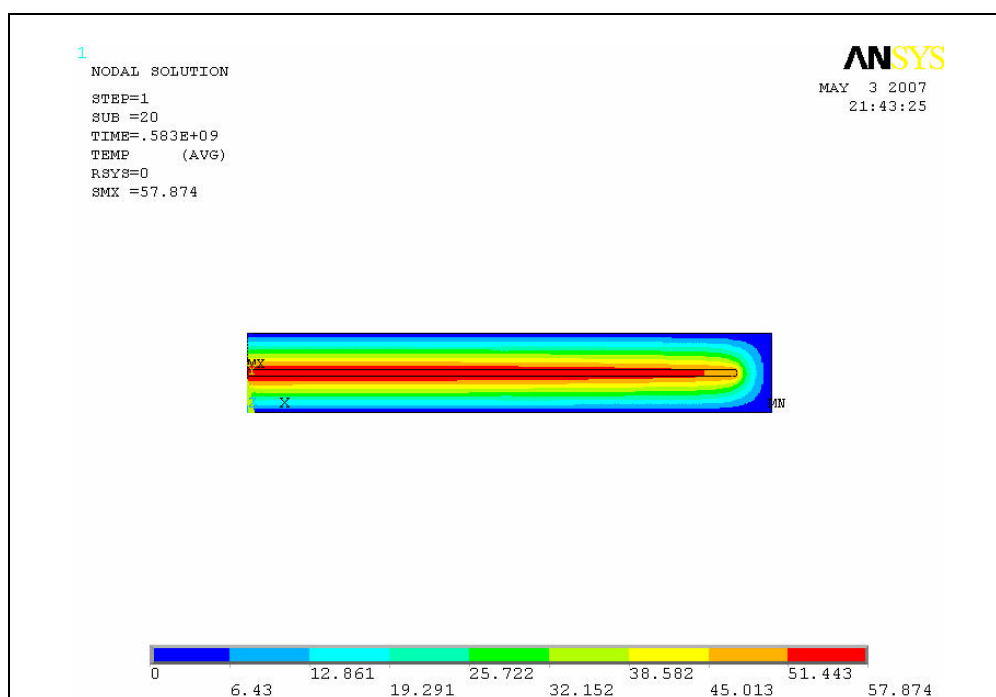


A.2 Sít' konečných prvků pro 3D model s jedním kontejnerem (25 metrů)

Příloha B Ukázky grafického zobrazení výsledků z programu Ansys



B.1 Rozložení teploty pro 2D model jednoho kontejneru bez bentonitu



B.2 Rozložení teploty pro osově souměrný 2D model úložiště

Příloha C Ukázka příkazového souboru *.log

```

/BATCH
/COM,ANSYS RELEASE 10.0
UP20050718 19:06:48 04/28/2007
/input,menust,tmp,",,,,,,,,,,,,,1
/GRA,POWER
/GST,ON
/PLO,INFO,3
/GRO,CURL,ON
/CPLANE,1
/REPLOT,RESIZE
WPSTYLE,,,,,,,,0
/SOLU
FINISH
/PREP7
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,2.7
MPTEMP,1,0
MPDATA,C,1,,850
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,2700
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,2,,460
MPTEMP,1,0
MPDATA,C,2,,45
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,2,,7800
!*
ET,1,LINK33
!*
FLST,3,1,8
FITEM,3,0,0,0
K,,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,0,27.5,0
K,,P51X
FLST,3,1,8
FITEM,3,0,30,0
K,,P51X
LSTR, 1, 2
LSTR, 2, 3
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
LGLUE,P51X

CM,_Y,LINE
LSEL,, , , 2
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,2, ,1, , , ,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,LINE
LSEL,, , , 1
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
!*
!*
CMSEL,S,_Y1
LATT,1, ,1, , , ,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-2
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1,0.1, , , , , ,1
!*
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
LMESH,P51X
/DIST,1,1.08222638492,1
/REP,FAST
/DIST,1,1.08222638492,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST

/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.924021086472,1
/REP,FAST
/UI,MESH,OFF
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE,4
!*
TRNOPT,FULL
LUMPM,0
!*
DELTIM,1.58e7,1.58e7,3.15e8
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
AUTOTS,1
LNSRCH,1
TIME,1.58e10
FLST,2,1,3,ORDE,1
FITEM,2,1
!*
/GO
DK,P51X, ,0, ,0,TEMP, , , , ,
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,2
/GO
!*
!*
*DIM,vykon,TABLE,17,1,1,time, , , 0
!*
*TREAD,vykon,'tab','txt',' ',0,
!*
BFL,P51X,HGEN, %vykon%
FLST,2,301,1,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-301
IC,P51X,TEMP,0,
/STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/PREP7

```


Příloha D Obsah DVD

Příložené DVD obsahuje počítané modely v těchto adresářích:

- 2D_kontejner
 - 2D_bentonit (2D model jednoho kontejneru s nekonečně velkou výškou s bentonitem)
 - 2D_bez_bent (2D model jednoho kontejneru s nekonečně velkou výškou bez bentonitu)
- 3D_kontejner
 - 3D_kont_5m (3D model jednoho kontejneru s výškou 5 metrů bez bentonitu)
 - 3D_kont_25m (3D model jednoho kontejneru s výškou 25 metrů bez bentonitu)
- uloziste
 - 1D_uloziste (1D model úložiště s nekonečnými rozměry v obou horizontálních směrech)
 - 2D_uloziste (2D osově souměrný model úložiště – úložiště s konečnými rozměry)
- termoelasticita (2D osově symetrická úloha s jedním kontejnerem o výšce 5 metrů)

Literatura

- [1] Nowacki W.: Problémy termoelasticity, SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1968
- [2] Blaheta R., Krečmer K., Starý J.: Modelling of T-H-M processes arising from geological deposition of the spent nuclear fuel, Research report, Ostrava 2005
- [3] SÚRAO: Hlubinné úložiště radioaktivních odpadů, Praha 2005
- [4] ÚJV Řež a.s., Shromáždění a aktualizace vstupních údajů o vývoji tepla vyhořelých palivových souborů, Výstup 1.2, Březen 2006
- [5] ÚGN: Modelové výpočty termoelastického pole v jednotlivých fázích výstavby úložiště, 2006
- [6] Ansys – Analysis Guide, elektronická dokumentace systému Ansys